

ЗАЩИТА ОТ ИОНИЗИРУЮЩИХ ИЗЛУЧЕНИЙ

В. П. Машкович
А. В. Кудрявцева

ЗАЩИТА
ОТ ИОНИЗИРУЮЩИХ
ИЗЛУЧЕНИЙ

СПРАВОЧНИК

ЭНЕРГОАТОМИЗДАТ

ББК 51.26

М 38

УДК 539.16:658.382.3(035.5)

Авторы благодарят научно-внедренческую фирму «Зиверт-системы», научно-производственное предприятие ALARA Limited, научно-производственное предприятие «Доза» за финансовую поддержку при издании справочника.

Машкович В. П., Кудрявцева А. В.

М 38 Защита от ионизирующих излучений: Справочник — 4-е изд., перераб. и доп. — М.: Энергоатомиздат, 1995. — 496 с.: ил.

ISBN 5-283-03059-8

Справочник содержит необходимые данные для расчета защиты при работе с радиоактивными веществами и другими источниками ионизирующих излучений. Приводятся физические величины, единицы и основные соотношения в области ионизирующих излучений, характеристики источников излучения, предельно допустимые уровни излучений, информация по защите от α -, β -, γ -излучений и нейтронов, по альбедо излучений. 4-е издание справочника (3-е вышло в 1982 г.) полностью переработано и дополнено данными, появившимися после 1982 г.

Для специалистов, занимающихся вопросами защиты при работе с источниками ионизирующих излучений.

М 360400000-020 Без объявл.
051 (01)-95

ББК 51.26

© Энергоатомиздат, 1982

© Авторы, 1995, с изменениями

ISBN 5-283-03059-8

ПРЕДИСЛОВИЕ

Сегодня трудно указать область знаний или народного хозяйства, где бы не использовались радионуклиды или другие источники ионизирующих излучений.

Среди всех областей использования источников ионизирующих излучений следует отметить прежде всего ядерную энергетику. За 40 лет развития мощность энергоблоков атомных электростанций (АЭС) возросла в 200 раз. В мире действует более 400 ядерных реакторов общей электрической мощностью более 300 ГВт. АЭС позволили сэкономить сотни миллионов тонн угля и нефти. В некоторых странах значительная часть электроэнергии вырабатывается на АЭС: во Франции — 72 %, Бельгии — 59,3 %, Швеции — 51,6 %, США — 21,7 %, Великобритании — 21 %. В России на девяти АЭС эксплуатируется 28 энергоблоков с общей электрической мощностью около 20 ГВт.

Авария на Чернобыльской АЭС (ЧАЭС) — самая крупная катастрофа современности — в какой-то мере подорвала доверие к ядерной энергетике, заставила подвергнуть тщательной ревизии АЭС страны и временно снизила темпы ввода новых мощностей АЭС. Возникла необходимость принятия дополнительных мер по повышению безопасности АЭС. Особенно актуальной стала задача создания АЭС с «внутренней безопасностью».

Вместе с тем ядерная энергетика остается важным источником получения энергии. Другой равноценной альтернативы ядерной энергетике в области энергоресурсов сегодня нет. При нормальной эксплуатации ядерная энергетика для окружающей среды наиболее безопасна. Поэтому нет сомнения в том, что и дальше ядерная энергетика будет развиваться как в нашей стране, так и в других странах мира. Авария на ЧАЭС в 1986 г., так же как и крупная авария на американской АЭС «Тримайл айленд» («Трехмильный остров») в 1979 г., еще раз особенно ярко высветили значимость проблем радиационной безопасности.

Радиационные технологии, радиационное приборостроение, радионуклидная энергетика, радиационная терапия и диагностика прочно вошли в практику народного хозяйства страны, позволяют совершенствовать и интенсифицировать производство, повышать производительность труда, улучшать качество получаемой продукции, ставить диагнозы, лечить злокачественные новообразования и т. д.

Мощные облучательные стационарные и передвижные установки, аппараты для лучевой терапии, радиационные дефектоскопы, толщиномеры, плотномеры, влагомеры, измерители и сигнализаторы уровня жидкости, высотомеры, нейтрализаторы статического электричества, приборы ядерной геофизики и активационного анализа, электрокардиостимуляторы, радионуклидные термоэлектрические генераторы, счетчики предметов — далеко не полный перечень широко используемых аппаратов, установок и приборов, работающих с источниками ионизирующих излучений. Заметим, что в нашей стране сейчас выпускается 140 различных радионуклидов, применяемых в тысячах различных научных учреждений и промышленных предприятий.

Утверждение ядерной энергетике как нового перспективного источника производства электроэнергии, применение энергетических и ис-

следовательских реакторов, ускорителей заряженных частиц, радионуклидов и других источников ионизирующих излучений в различных областях народного хозяйства, науки, техники и медицины неразрывно связаны с проблемой радиационной безопасности, с задачами проектирования и создания биологических защит.

Практическая значимость проблемы радиационной безопасности обусловлена также и ее высокой стоимостью. В связи с этим нелишне напомнить, что, например, доля затрат на обеспечение безопасности строящихся сегодня АЭС составляет почти 50 % общих капиталовложений в АЭС. Стоимость защиты современных ядерно-технических установок может составлять 20—30 % стоимости сооружения, толщина защиты достигает больших размеров, например, толщина защиты ядерных реакторов мощностью 10—50 МВт в пересчете на обычный бетон составляет 2,8—3,5 м. Очень дорого обходятся государству безответственность и недисциплинированность при работе с мощными источниками ионизирующих излучений. Именно они были причиной аварии на ЧАЭС, на ликвидацию последствий которой направлены огромные ресурсы.

В области радиационной безопасности в нашей стране и за рубежом накоплен большой опыт. Большие заслуги в исследованиях проблем защиты от излучений принадлежат российским ученым и специалистам. Актуальность, социальная и практическая значимость проблемы, большой объем имеющейся в литературе информации, все увеличивающееся число специалистов, привлеченных к решению задач радиационной безопасности и защиты, определяют целесообразность издания справочной литературы по защите от ионизирующих излучений.

Десять лет назад объем научной информации удваивался каждые 5—7 лет. Сейчас это происходит значительно быстрее. Отсюда ясно, что за 13 лет, прошедшие после выхода в свет третьего издания справочника, появилось много новой информации, а значительная часть приведенной в нем оказалась устаревшей. Защита от ионизирующих излучений является постоянно развивающейся областью знаний. Например, в последние годы возникли задачи защиты, связанные с прекращением эксплуатации реакторов АЭС и других ядерно-технических установок, выработавших свой ресурс. При этом должны быть минимизированы дозовые нагрузки облучения персонала и населения при снятии с эксплуатации этих установок.

Можно указать на еще один круг новых задач — проблемы защиты при выполнении работ по ликвидации последствий крупных аварий на ядерно-технических установках. Справочник пополнен информацией, необходимой, в частности, и для решения этих задач.

В настоящем, четвертом, переработанном и дополненном, издании справочника вся приводимая информация переработана, пересмотрена и оценена заново, пополнена новыми данными, уточнена в соответствии с результатами последних отечественных и зарубежных исследований.

Приводимые в книге материалы достаточны для решения большинства задач защиты от излучений и позволяют выполнить все этапы расчета защиты: выбрать физические величины и их единицы (гл. 1), определить характеристики источников (гл. 2), выбрать предельно допустимые уровни облучения (гл. 3), рассчитать поля излучения источников (гл. 4), при требуемых кратностях ослабления излучения $k > 1$ определить защиту от наиболее широко используемых источников фотонного излучения (гл. 5), нейтронов (гл. 6), α - и β -частиц (гл. 7). Дан-

ные по альбедо (гл. 8) позволяют рассчитать поля отраженных нейтронов, фотонов и электронов.

Первая глава посвящена физическим величинам и их единицам в области радиационной безопасности. Нормативными документами в нашей стране с 1980 г. введена в действие Международная система единиц (СИ) как обязательная при использовании в народном хозяйстве. Поэтому справочник, как и предыдущее издание, составлен с использованием единиц СИ в соответствии с последними ГОСТами и руководящими нормативными документами.

Наряду с единицами Международной системы до последнего времени широко использовались изымаемые из обращения внесистемные единицы активности и дозиметрических характеристик полей ионизирующих излучений: кюри для активности; рад для поглощенной дозы и кермы; бэр для эквивалентной дозы; рентген для экспозиционной дозы фотонного излучения; частные от деления рад, бэр, рентгена или их кратных или дольных единиц на подходящую единицу времени для мощности поглощенной дозы, кермы, эквивалентной, экспозиционной дозы соответственно. Изъятие этих единиц из обращения должно быть осуществлено в соответствии с руководящим нормативным документом РД 50-454-84 до 1 января 1990 г.

Однако специалисты в опубликованных ранее монографиях, статьях, отчетах, различной документации будут еще многие годы встречаться с внесистемными единицами физических величин. Поэтому вместе с единицами СИ в гл. 1 рассмотрены также изымаемые из обращения внесистемные единицы.

Использованное в этой главе понятие базисной и фантомной дозиметрической величины позволяет более однозначно интерпретировать применяемые дозиметрические величины.

Гл. 2 пересмотрена в свете новых данных о характеристиках излучения радионуклидов. Впервые введенная новая трактовка гамма-постоянной радионуклида как стандартной характеристики γ -излучения радионуклида по мощности любой дозиметрической величины вместе с приводимыми новыми значениями гамма-постоянных расширяет возможность использования этой величины на практике.

Гл. 3 написана исходя из последней редакции норм НРБ-76/87. Дополнить материалы этой главы при необходимости могут такие нормативные документы, как «Основные санитарные правила работы с радиоактивными веществами и другими источниками ионизирующих излучений ОСП-72/87», а также санитарные правила эксплуатации различных ядерно-технических установок.

Гл. 4 посвящена расчетам полей излучений источников без защиты и за защитой. В гл. 5 приводится новая большая информация по факторам накопления, помещена новая версия универсальных таблиц Н. Г. Гусева, новый набор слоев ослабления. В шестой главе приводится новая удобная таблица по сечениям взаимодействия для тепловых нейтронов. Гл. 7 значительно пополнена новыми данными по потерям энергии электронов, причем вместе с полными приводятся ионизационные и радиационные потери. В гл. 8 включены новые данные по скайшайн (отражение от воздуха вблизи границы с Землей) фотонов и нейтронов и по альбедо фотонов низких энергий.

Для сложных случаев в справочнике даны численные примеры использования приводимой информации.

В четвертом издании книги сохранены особенности предыдущих изданий: рассмотрены все основные вопросы защиты от излучений, а приводимый материал достаточен для решения большинства задач защиты от излучений; сочетание краткого пояснительного текста с необходимой количественной информацией придает книге функции не только справочника, но и практического руководства по расчетам защиты. Достаточность материалов справочника для решения большинства практических задач защиты подтвердилась и при его использовании при выполнении работ по ликвидации последствий аварии на ЧАЭС.

Вопросы защиты отдельных видов ядерно-технических установок или избранные разделы защиты рассмотрены в специализированных учебниках, учебных пособиях, монографиях и справочниках. При необходимости читатель может использовать, например, следующие справочники по защите от излучений, выпущенные Энергоатомиздатом: «Справочник по защите от излучения протяженных источников» Б. Р. Бергельсона и Г. А. Зорикоева (1965 г.), «Биологическая защита ядерных реакторов» (перевод с англ. под ред. Ю. А. Егорова, 1965 г.), «Защита от гамма-излучения продуктов деления» Н. Г. Гусева (1968 г.), «Руководство по радиационной защите для инженеров» (перевод с англ. под ред. Д. Л. Бродера и др. Том I — 1972 г., том II — 1973 г.), «Сечения взаимодействия гамма-излучения» Э. Сторма и Х. Исраэля (перевод с англ. В. А. Климанова, Е. Д. Чистова, 1973 г.), «Ядерно-физические константы взаимодействия нейтронов с элементами, входящими в состав атмосферы и земной коры» Ю. А. Медведева, Б. М. Степанова, Г. А. Труханова (1981 г.), «Групповые константы для расчетов реакторов и защиты» Л. П. Абагян и др. (1981 г.). Полезная информация содержится в опубликованных Энергоатомиздатом рекомендациях Международной комиссии по радиологической защите (МКРЗ), докладах Международной комиссии по радиационным единицам и измерениям (МКРЕ), в трудах регулярных международных и национальных конференций по радиационной защите, в сборниках статей «Радиационная безопасность и защита АЭС».

Дальнейшему совершенствованию справочника способствовало участие в нем А. В. Кудрявцевой. Ею был рассчитан на ЭВМ новый набор гамма-постоянных радионуклидов, построена новая версия универсальных таблиц, подготовлены новые данные по характеристикам излучения радионуклидов, по факторам накопления фотонов, по потерям энергии заряженных частиц, по активации радионуклидов и т. д., выполнена большая работа по подготовке четвертого издания. В таблицах часто принята краткая форма записи числа $a \cdot 10^{\pm b}$ в виде $a \pm b$.

Справочник предназначен для инженеров-физиков, инженеров-проектировщиков, научных работников, аспирантов, студентов и практических работников, занимающихся вопросами защиты при работе с источниками ионизирующих излучений. Он соответствует курсу защиты от ионизирующих излучений, изучаемому в инженерно-физических и физико-технических высших учебных заведениях. Собранный в книге справочный материал достаточен для решения практических задач этого курса.

Справочник может быть полезен всем, кто работает с радиоактивными нуклидами и другими источниками ионизирующих излучений.

В. П. Машкович

Глава I

ФИЗИЧЕСКИЕ ВЕЛИЧИНЫ И ИХ ЕДИНИЦЫ В ОБЛАСТИ РАДИАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ

§ 1.1. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ

Ниже приводятся определения основных терминов в области ионизирующих излучений и радиоактивности [1].

Ионизирующее излучение — излучение, взаимодействие которого со средой приводит к образованию ионов разных знаков.

Примечание. Видимый свет и ультрафиолетовое излучение не включают в понятие «ионизирующее излучение». В дальнейшем в книге как сокращенная форма используется также термин «излучение».

Ионизирующая частица — частица корпускулярного ионизирующего излучения или фотон.

Непосредственно ионизирующее излучение — ионизирующее излучение, состоящее из заряженных частиц, имеющих кинетическую энергию, достаточную для ионизации при столкновении.

Примечание. Непосредственно ионизирующее излучение может состоять из электронов, протонов, альфа-частиц, бета-частиц и др.

Косвенно ионизирующее излучение — ионизирующее излучение, состоящее из незаряженных частиц, которые могут создавать непосредственно ионизирующее излучение и (или) вызвать ядерные превращения.

Примечание. Косвенно ионизирующее излучение может состоять из нейтронов, фотонов и др.

Фотонное ионизирующее излучение — электромагнитное косвенно ионизирующее излучение.

Гамма-излучение — фотонное излучение, возникающее при изменении энергетического состояния атомных ядер или при аннигиляции частиц.

Тормозное излучение — фотонное излучение с непрерывным энергетическим спектром, возникающее при уменьшении кинетической энергии заряженных частиц.

Характеристическое излучение — фотонное излучение с дискретным энергетическим спектром, возникающее при изменении энергетического состояния электронов атома.

Рентгеновское излучение — фотонное излучение, состоящее из тормозного и (или) характеристического излучений.

Корпускулярное излучение — ионизирующее излучение, состоящее из частиц с массой, отличной от нуля.

Примечание. Нейтринное излучение также относится к корпускулярному излучению.

Моноэнергетическое ионизирующее излучение — ионизирующее излучение, состоящее из фотонов одинаковой энергии или частиц одного вида с одинаковой кинетической энергией.

Немоноэнергетическое ионизирующее излучение — ионизирующее излучение, состоящее из фотонов различной энергии или частиц одного вида с разной кинетической энергией.

Примечание. β -Излучение радионуклидов является немонэнергетическим, так как состоит из β -частиц различных энергий.

Смешанное ионизирующее излучение — ионизирующее излучение, состоящее из частиц различного вида или из частиц и фотонов.

Направленное ионизирующее излучение — ионизирующее излучение с выделенным направлением распространения.

Первичное ионизирующее излучение — излучение, которое в рассматриваемом процессе взаимодействия со средой является исходным или принимается за исходное.

Вторичное ионизирующее излучение — излучение, возникающее в результате взаимодействия первичного ионизирующего излучения с данной средой. Вторичное излучение может также инициировать вторичное по отношению к нему излучение или третичное по отношению к первичному и т. д.

Поле ионизирующего излучения — распределение ионизирующего излучения в рассматриваемой среде. В зависимости от величины, характеризующей ионизирующее излучение, различают характеристики поля по плотности потока частиц, мощности поглощенной дозы, мощности кермы и т. д.

Нуклид — вид атомов с данными числами протонов и нейтронов в ядре.

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

Радионуклид — нуклид, обладающий радиоактивностью.

Изотоп — нуклид с числом протонов в ядре, свойственным данному элементу.

Радиоизотоп — изотоп, обладающий радиоактивностью.

Источник ионизирующего излучения — объект, содержащий радиоактивный материал, или техническое устройство, испускающее или способное в определенных условиях испускать ионизирующее излучение.

Радионуклидный источник ионизирующего излучения — источник ионизирующего излучения, содержащий радиоактивный материал.

§ 1.2. МЕЖДУНАРОДНАЯ СИСТЕМА ЕДИНИЦ (СИ)

В нашей стране ГОСТ 9867—61 «Международная система единиц» с 1963 г. установил предпочтительное применение *Международной*

*системы единиц (СИ)**. Постановлением Государственного Комитета СССР по стандартам с 1 января 1980 г. стандартом СТ СЭВ 1052—78 «Метрология. Единицы физических величин» [2] Международная система единиц была введена в действие как обязательная при использовании в народном хозяйстве страны. В 1981 г. на основе СТ СЭВ 1052—78 утвержден ГОСТ 8.417—81 «Единицы физических величин» [3] со сроком введения с 1 января 1982 г. Таким образом, Государственным стандартом вводятся в действие как обязательная Международная система единиц физических величин, а также десятичные кратные и дольные от них единицы. Заметим, что в связи с введением ГОСТ 8.417—81 действие методических указаний [4] распространено на этот ГОСТ.

Порядок внедрения и применения ГОСТ 8.417-81 в области ионизирующих излучений определяется методическими указаниями [5]. В частности, этим руководящим нормативным документом установлено, что переход на единицы СИ должен быть осуществлен в переходный период до 1 января 1990 г.

Международная система единиц состоит из семи основных, двух дополнительных и производных единиц, образованных из основных и дополнительных единиц (табл. 1.1).

Существует ограниченная группа единиц, которую не во всех случаях можно заменить единицами СИ. Поэтому наравне с единицами

Таблица 1.1

Основные, дополнительные и некоторые производные единицы СИ

Величина	Единица		Величина	Единица	
	Наименование	Обозначение		Наименование	Обозначение
Основные единицы			Некоторые производные единицы		
Длина	метр	м	Площадь	квадратный метр	м ²
Масса	килограмм	кг	Объем	кубический метр	м ³
Время	секунда	с	Плотность	килограмм на кубический метр	кг/м ³
Сила электрического тока	ампер	А			
Термодинамическая температура	кельвин	К	Скорость	метр в секунду	м/с
Количество вещества	моль	моль			
Сила света	кандела	кд	Сила, вес	ньютон	Н
Дополнительные единицы			Давление	паскаль	Па
Плоский угол	радиан	рад	Работа, энергия	джоуль	Дж
			Мощность, поток энергии	ватт	Вт
Телесный угол	стерадиан	ср	Количество электричества (электрический заряд)	кулон	Кл

* Международная система единиц — международное сокращенное наименование SI, в русской транскрипции СИ. При использовании сокращенного наименования СИ рекомендуется не сопровождать его словом «система», так как оно уже входит в наименование в виде буквы «эс». Поэтому следует говорить и писать «единицы СИ», а не «единицы системы СИ».

Таблица 1.2

Внесистемные единицы, допускаемые к применению наравне с единицами СИ без ограничения срока

Наименование величины	Единица		
	Наименование	Обозначение	Соотношение с единицей СИ
Масса	тонна	т	1 т = 10 ³ кг
	атомная единица массы	а.е.м.	1 а.е.м. = 1,66057 · 10 ⁻²⁷ кг (приблизительно)
Время	минута	мин	1 мин = 60 с
	час	ч	1 ч = 3600 с
	сутки	сут	1 сут = 86400 с
	год	год	1 год = 3,1536 · 10 ⁷ с для простых годов; 1 год = 3,16224 · 10 ⁷ с для високосных годов
Плоский угол	градус	...°	1° = (π/180) рад = = 1,745329 ... · 10 ⁻² рад
	минута	...'	1' = (π/10800) рад = = 2,908882 ... · 10 ⁻⁴ рад
	секунда	...''	1'' = (π/648000) рад = = 4,848137 ... · 10 ⁻⁶ рад
Объем, вместимость	литр	л	1 л = 10 ⁻³ м ³
Энергия	электрон-вольт	эВ	1 эВ = 1,60219 · 10 ⁻¹⁹ Дж (приблизительно)

Примечание. Внесистемные единицы времени, плоского угла и атомную единицу массы не допускается применять с приставками.

СИ допущен к применению без ограничения срока ряд единиц. В табл. 1.2 приведены такие единицы, нашедшие широкое применение в радиационной безопасности. Заметим, что для атомной науки и техники особую положительную роль играет разрешение использовать внесистемную единицу энергии электрон-вольт и ее десятичные кратные единицы. Эти единицы рекомендуется применять для энергии отдельных ионизирующих частиц E . Для энергии ионизирующего излучения W — суммарной энергии ионизирующих частиц (без учета энергии покоя), испущенной, переданной или поглощенной, рекомендуется единица СИ — джоуль и ее десятичные кратные и дольные единицы.

Введением ГОСТ 8.417—81 изымаются из обращения все основные широко использовавшиеся ранее внесистемные единицы активности (кюри) и дозиметрических величин (рентген, рад, бэр). В табл. 1.3

приведены соотношения между единицами СИ и внесистемными изымаемыми из обращения единицами в области радиационной безопасности.

Таблица 1.3

Соотношения между единицами СИ и внесистемными изымаемыми из обращения единицами в области радиационной безопасности

Величина и ее символ	Единица СИ		Внесистемная единица		Соотношения между единицами
	Наименование	Обозначение	Наименование	Обозначение	
Активность A	беккерель	Бк	кюри	Ки	1 Ки = 3,700 · 10 ¹⁰ Бк
Поглощенная доза D , керма K	грей	Гр	рад	рад	1 рад = 1 · 10 ⁻² Гр
Эквивалентная доза H , эффективная эквивалентная доза H_E	зиверт	Зв	бэр	бэр	1 бэр = 1 · 10 ⁻² Зв
Экспозиционная доза X^*	кулон на килограмм	Кл/кг	рентген	Р	1 Р = 2,58 · 10 ⁻⁴ Кл/кг
Сечение взаимодействия σ	квадратный метр	м ²	барн	б	1 б = 10 ⁻²⁸ м ²
Поглощенная доза для единичного флюенса δ_D , керма для единичного флюенса δ_K	грей-метр в квадрате	Гр · м ²	рад-сантиметр в квадрате	рад · см ²	1 рад · см ² = = 1 · 10 ⁻⁶ Гр · м ²
Эквивалентная доза для единичного флюенса δ_H	зиверт-метр в квадрате	Зв · м ²	бэр-сантиметр в квадрате	бэр · см ²	1 бэр · см ² = = 1 · 10 ⁻⁶ Зв · м ²
Концентрация радионуклида в воздухе A_V	беккерель на кубический метр	Бк/м ³	кюри на литр	Ки/л	1 Ки/л = = 3,700 · 10 ¹³ Бк/м ³
Концентрация радионуклида в воде A_V	беккерель на литр	Бк/л	кюри на литр	Ки/л	1 Ки/л = = 3,700 · 10 ¹⁰ Бк/л
Энергия ионизирующей частицы E	джоуль	Дж	электрон-вольт	эВ	1 эВ = 1,602 · 10 ⁻¹⁹ Дж

Продолжение табл. 1.3

Величина и ее символ	Единица СИ		Внесистемная единица		Соотношения между единицами
	Наименование	Обозначение	Наименование	Обозначение	
Линейная передача энергии (ЛПЭ) L	джоуль на метр	Дж/м	килоэлектрон-вольт на микрометр	кэВ/мкм	$1 \text{ кэВ/мкм} = 1,602 \cdot 10^{-10} \text{ Дж/м}$

* Экспозиционная доза подлежит изъятию в переходный период на единицы СИ до 1 января 1990 г.

В зарубежной литературе, в основном американской и английской, до перехода на метрическую систему единиц широко применялись неметрические единицы. Соотношения этих единиц с единицами СИ приведены в табл. 1.4 [6, 7].

Десятичные кратные и дольные единицы, а также их наименования и обозначения следует образовывать с помощью множителей и приставок, приведенных в табл. 1.5. Правила образования десятичных кратных и дольных единиц и рекомендации по их выбору изложены в ГОСТ 8.417—81

Таблица 1.4

Соотношение внесистемных неметрических единиц, применявшихся в США и Великобритании, с единицами СИ

Величина	Внесистемная единица		Соотношение с единицей СИ*
	Наименование	Международное обозначение	
Длина	дюйм	in	$1 \text{ in} = 2,54 \cdot 10^{-2} \text{ м (точно)}$
	фут	ft	$1 \text{ ft} = 3,048 \cdot 10^{-1} \text{ м (точно)}$
	миля	mi	$1 \text{ mi} = 1,609344 \cdot 10^3 \text{ м (точно)}$
Площадь	квадратный дюйм	in ²	$1 \text{ in}^2 = 6,4516 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2 \text{ (точно)}$
	квадратный фут	ft ²	$1 \text{ ft}^2 = 9,290304 \cdot 10^{-2} \text{ м}^2 \text{ (точно)}$
	квадратная миля	mi ²	$1 \text{ mi}^2 = 2,589988 \cdot 10^6 \text{ м}^2$
Объем, вместимость	кубический дюйм	in ³	$1 \text{ in}^3 = 1,638706 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3$
	кубический фут	ft ³	$1 \text{ ft}^3 = 2,831685 \cdot 10^{-2} \text{ м}^3$
	галлон американский	gal (US)	$1 \text{ gal} = 3,785412 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3$
Масса	фунт	lb	$1 \text{ lb} = 4,535924 \cdot 10^{-1} \text{ кг}$

* Приводится международное обозначение единиц СИ: для метра — м, для килограмма — кг.

Таблица 1.5

Множители и приставки для образования десятичных кратных и дольных единиц и их наименований

Множитель	Приставка	Обозначение	Множитель	Приставка	Обозначение	Множитель	Приставка	Обозначение
10 ¹⁸	экса	Э	10 ²	гекто	г	10 ⁻⁹	нано	н
10 ¹⁵	пета	П	10 ¹	дека	да	10 ⁻¹²	пико	п
10 ¹²	тера	Т	10 ⁻¹	деци	д	10 ⁻¹⁵	фемто	ф
10 ⁹	гига	Г	10 ⁻²	санτι	с	10 ⁻¹⁸	атто	а
10 ⁶	мега	М	10 ⁻³	милли	м			
10 ³	кило	к	10 ⁻⁶	микро	мк			

[3]. Подробно единицы СИ применительно к атомной науке и технике рассмотрены в [6—13].

В заключение параграфа сформулируем некоторые важные метрологические понятия.

Физическая величина — свойство, общее в качественном отношении многим объектам, но в количественном отношении индивидуальное для каждого объекта.

Единица физической величины — значение конкретной физической величины, которой по определению присвоено числовое значение, равное единице.

Значение физической величины — оценка физической величины в виде некоторого числа принятых для нее единиц.

Числовое значение физической величины — отвлеченное число, входящее в значение физической величины.

Размерность физической величины — символическое обозначение, выражение, показывающее связь данной величины с основными физическими величинами (табл. 1.1), положенными в основу системы единиц. Размерность физической величины записывается в виде произведения символов соответствующих основных величин, возведенных в определенные степени. Для основных физических величин длины, массы, времени, силы электрического тока, термодинамической температуры, количества вещества и силы света приняты символы размерности L, M, T, I, Θ, N, J соответственно. Тогда, например, размерность поглощенной дозы $[D] = \text{dim} D$ может быть записана как $[D] = \text{dim} D = L^2 T^{-2}$.

Проиллюстрируем приведенные понятия на примере активности, равной 270 Бк. Физическая величина — активность, единица физической величины — беккерель, значение физической величины (активности) 270 Бк, числовое значение физической величины (активности), выраженное в беккерелях, 270, размерность T^{-1} .

Из приведенного выше следует, что неправильно говорить «величина активности», так как активность и есть величина. Нельзя также допускать частую ошибку и называть единицу физической величины размерностью.

§ 1.3. АКТИВНОСТЬ РАДИОНУКЛИДА

Активность радионуклида в источнике (образце) — отношение числа dN_0 спонтанных ядерных переходов из определенного ядерно-энергети-

ческого состояния радионуклида, происходящих в данном его количестве за интервал времени dt , к этому интервалу:

$$A = dN_0/dt. \quad (1.1)$$

Самопроизвольное ядерное превращение называют *радиоактивным распадом*.

Примечание. Под «определенным ядерно-энергетическим состоянием» радионуклида подразумевается его основное состояние, если не указано какое-либо другое состояние.

Единица активности радионуклида — *беккерель* (Бк)*.

Беккерель равен активности радионуклида в источнике (образце), в котором за время 1 с происходит одно спонтанное ядерное превращение. Внесистемная единица активности — *кюри* (Ки)^{*1}.

Кюри — активность радионуклида в источнике (образце), в котором за время 1 с происходит $3,700 \cdot 10^{10}$ спонтанных ядерных превращений.

Таким образом, $1 \text{ Ки} = 3,700 \cdot 10^{10} \text{ Бк}$ (точно).

Отношение активности радионуклида в радиоактивном источнике (образце) к массе, объему (для объемных источников), площади поверхности (для поверхностных источников) или длине (для линейных источников) источника (образца) называется *удельной* A_m , *объемной* A_V , *поверхностной* A_S^{*2} или *линейной* A_L активностью радионуклида соответственно.

Выбор единиц этих величин определяется конкретной задачей. Например, допустимую концентрацию (объемную активность) радионуклида в воде удобнее выражать в Бк/л, а в воздухе — Бк/м³, так как суточное потребление человеком воды определяется обычно в литрах, а воздуха — в кубических метрах.

Активность

$$A = \lambda N = 0,693N/T_{1/2}, \quad (1.2)$$

где N — число радиоактивных атомов, имеющих в источнике в данный момент времени; λ — *постоянная распада*, характеризующая вероятность распада на один атом в единицу времени; $T_{1/2}$ — *период полураспада* — время, в течение которого распадается половина радиоактивных атомов нуклида (для наиболее широко распространенных радионуклидов значения $T_{1/2}$ приведены в табл. 2.2 и 2.4); $0,693 = \ln 2$.

Наиболее часто встречающиеся типы распада приведены в табл. 1.6.

Распад ядер сопровождается испусканием корпускулярных частиц и (или) фотонов, при этом число ядерных превращений далеко не всегда совпадает с числом испускаемых корпускулярных частиц и, еще реже, — с числом испускаемых фотонов. Термины α -, или β -, или γ -активность не являются строгими и недопустимы, так как активность характери-

* Антуан Анри Беккерель (1852—1908 гг.) — французский физик, открыл радиоактивность солей урана, лауреат Нобелевской премии.

*1 Названа в честь французских ученых, лауреатов Нобелевской премии супругов Пьера Кюри (1859—1906 гг.) и Марии Склодовской-Кюри (1867—1934 гг.), открывших радиоактивность полония и радия, основоположников учения о радиоактивности.

*2 Для поверхностных источников вместо нижнего индекса S используют также индекс A .

Изменение атомной массы и атомного номера при различных типах распада нуклида

Тип распада	Атомная масса		Атомный номер	
	материнский нуклид	дочерний нуклид	материнский нуклид	дочерний нуклид
α -Распад	A	$A-4$	Z	$Z-2$
β^- -Распад	A	A	Z	$Z+1$
β^+ -Распад	A	A	Z	$Z-1$
Электронный захват	A	A	Z	$Z-1$
Изомерный переход	A	A	Z	Z

зует лишь число ядерных переходов. Связать активность радионуклида с числом испускаемых корпускулярных частиц или фотонов можно, зная схему распада нуклида. Принятые обозначения схем распада показаны на рис. 1.1, а.

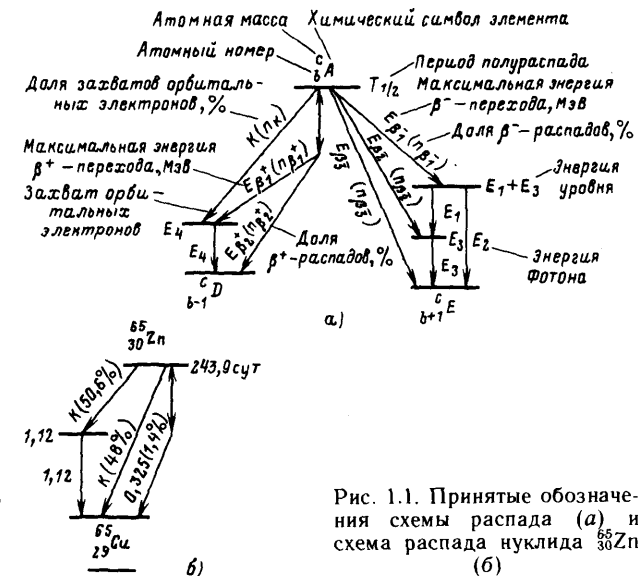


Рис. 1.1. Принятые обозначения схемы распада (а) и схема распада нуклида $^{65}_{30}\text{Zn}$ (б)

У нуклида $^{65}_{30}\text{Zn}$ (рис. 1.1, б), например, β^+ -частицы испускаются лишь в 1,4 % случаев распада, а фотоны — в 50,6 % случаев распада. Следовательно, этот радионуклид активностью 1 ГБк будет испускать $1,4 \cdot 10^7$ β^+ -частиц и $5,06 \cdot 10^8$ фотонов в 1 с.

Активность радионуклида, или число радиоактивных атомов нуклида в источнике, уменьшается во времени по экспоненциальному закону радиоактивного распада:

$$A(t) = A(t=0)\exp(-\lambda t) = A(t=0)\exp(-0,693t/T_{1/2}); \quad (1.3)$$

$$N(t) = N(t=0)\exp(-\lambda t) = N(t=0)\exp(-0,693t/T_{1/2}), \quad (1.4)$$

где $A(t=0)$ и $A(t)$ — активность радионуклида в начальный момент времени и через время t соответственно; $N(t=0)$ и $N(t)$ — число радиоактивных атомов нуклида в источнике в начальный момент времени и через время t соответственно.

Массу m в граммах радионуклида активностью A в беккерелях без учета массы неактивного носителя можно рассчитать по формуле

$$m = aMT_{1/2}A, \quad (1.5)$$

где M — атомная масса; $T_{1/2}$ — период полураспада; a — константа, зависящая от единиц, в которых выражается $T_{1/2}$ (табл. 1.7).

Таблица 1.7

Константы для формул (1.5) и (1.6)

Константа	$T_{1/2}$ выражено в				
	секундах	минутах	часах	сутках	годах
a	$2,40 \cdot 10^{-24}$	$1,44 \cdot 10^{-22}$	$8,62 \cdot 10^{-21}$	$2,07 \cdot 10^{-19}$	$7,56 \cdot 10^{-17}$
a_0	$8,86 \cdot 10^{-14}$	$5,32 \cdot 10^{-12}$	$3,19 \cdot 10^{-10}$	$7,66 \cdot 10^{-9}$	$2,80 \cdot 10^{-6}$
b	$4,17 \cdot 10^{23}$	$6,94 \cdot 10^{21}$	$1,16 \cdot 10^{20}$	$4,83 \cdot 10^{18}$	$1,32 \cdot 10^{16}$
b_0	$1,13 \cdot 10^{13}$	$1,88 \cdot 10^{11}$	$3,13 \cdot 10^9$	$1,30 \cdot 10^8$	$3,57 \cdot 10^5$

Если A выразить во внесистемных единицах кюри, то в формуле (1.5) константу a следует заменить на a_0 (табл. 1.7).

Активность A в беккерелях массы m в граммах радионуклида без учета массы неактивного носителя рассчитывается по формуле

$$A = bm/(MT_{1/2}), \quad (1.6)$$

где b — константа, зависящая от единиц, в которых выражено $T_{1/2}$ (табл. 1.7).

Если активность выразить во внесистемных единицах кюри, то коэффициент в формуле (1.6) следует заменить на b_0 (табл. 1.7).

Массу радиоактивного нуклида в граммах m_0 , приходящуюся на 1 г источника (образца), можно рассчитать по формуле

$$m_0 = (m/A)A_m, \quad (1.7)$$

где A_m — удельная активность источника (образца).

§ 1.4. ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОЛЯ ИЗЛУЧЕНИЯ

Исчерпывающая информация о поле частиц задается распределением частиц во времени, в пространстве и по энергии, иными словами, для полного представления о поле излучения необходимо указать, сколько частиц, с какой энергией и в каком направлении приходит в любую точку области пространства в каждый момент времени.

Поле излучения задается в потоковых или токовых величинах [6—9, 14, 15]. Рассмотрим потоковые характеристики поля излучения.

Наиболее полная информация о поле излучения задается *пространственно-временной энергетическо-угловой плотностью потока частиц* $\varphi(r, t, E, \Omega)$ *, которая представляет собой отношение числа ионизирующих частиц dN с энергией от E до $E+dE$, распространяющихся в направлении, определенном элементарным телесным углом $d\Omega$, содержащим данное направление Ω , и пересекающих в момент времени t за интервал времени dt элементарную площадку dS , центрированную в рассматриваемой точке поля r , нормаль к которой совпадает с выбранным направлением распространения Ω , к площади элементарной площадки dS , к интервалу времени dt , к энергетическому интервалу dE и к элементарному телесному углу $d\Omega$ (рис. 1.2, а): $\varphi(r, t, E, \Omega) = dN/(dSdt dE d\Omega)$.

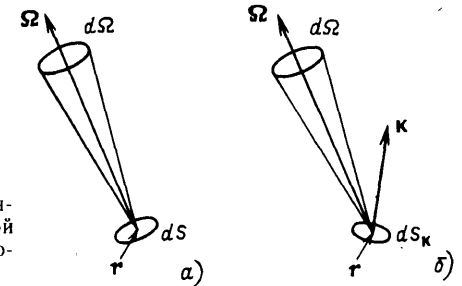


Рис. 1.2. К определению пространственно-временной энергетическо-угловой плотности потока частиц (а) и плотности скалярного тока частиц (б)

Если надо знать не поток частиц, а поток энергии этих частиц, то наиболее полная информация о поле задается *пространственно-временной энергетическо-угловой плотностью потока энергии частиц*:

$$I(r, t, E, \Omega) = E\varphi(r, t, E, \Omega). \quad (1.8)$$

Для решения многих задач удобными оказываются токовые характеристики поля излучения.

Наиболее подробная информация о поле в этом случае, как и для потоковых характеристик, задается *пространственно-временной энергетическо-угловой плотностью тока частиц* $J(r, t, E, \Omega)$, которая по модулю совпадает с $\varphi(r, t, E, \Omega)$, но в отличие от $\varphi(r, t, E, \Omega)$ является вектором, совпадающим с направлением распространения частиц Ω :

$$J(r, t, E, \Omega) = \Omega\varphi(r, t, E, \Omega). \quad (1.9)$$

Поле излучения по току можно также характеризовать не числом частиц, а их энергией, задавая *пространственно-временную энергетическо-угловую плотность тока энергии частиц*:

$$J_E(r, t, E, \Omega) = \Omega I(r, t, E, \Omega) = \Omega E\varphi(r, t, E, \Omega). \quad (1.10)$$

На практике нас обычно интересует не ток через площадку, положение которой строго определенным образом фиксируется результирующим вектором тока, а утечка через площадку, произвольным образом ориентированную в пространстве в соответствии с условием задачи, например через площадку на границе объемного источника или через площадку на границе защиты. Произвольную ориентацию площадки

* Здесь и ниже в этой главе r, Ω, J, k — векторные величины.

Дифференциальные и интегральные характеристики поля излучения¹

Наименование зависимости	Вид регистрируемого эффекта		
	Плотность потока частиц	Плотность тока частиц	Плотность скалярного тока частиц
Пространственно-временная энергетическо-угловая	$\varphi(r, t, E, \Omega)$ $1/(\text{см}^2 \cdot \text{с} \cdot \text{МэВ} \cdot \text{ср})$	$J(r, t, E, \Omega) = \Omega \varphi(r, t, E, \Omega)$ $1/(\text{см}^2 \cdot \text{с} \cdot \text{МэВ} \cdot \text{ср})$ (1.17)	$J_k(r, t, E, \Omega) = J(r, t, E, \Omega) \mathbf{k} = \varphi(r, t, E, \Omega) (\Omega \cdot \mathbf{k}) = \varphi(r, t, E, \Omega) \cos(\Omega, \mathbf{k})$ $1/(\text{см}^2 \cdot \text{с} \cdot \text{МэВ} \cdot \text{ср})$ (1.22)
Пространственная энергетическо-угловая	$\varphi(r, E, \Omega)$	$J(r, E, \Omega) = \Omega \varphi(r, E, \Omega)$ $1/(\text{см}^2 \cdot \text{с} \cdot \text{МэВ} \cdot \text{ср})$ (1.18)	$J_k(r, E, \Omega) = J(r, E, \Omega) \mathbf{k} = \varphi(r, E, \Omega) (\Omega \cdot \mathbf{k}) = \varphi(r, E, \Omega) \times \cos(\Omega, \mathbf{k})$ $1/(\text{см}^2 \cdot \text{с} \cdot \text{МэВ} \cdot \text{ср})$ (1.23)
Пространственно-угловая	$\varphi(r, \Omega) = \int_0^\infty \varphi(r, E, \Omega) dE$ $1/(\text{см}^2 \cdot \text{с} \cdot \text{ср})$ (1.14)	$J(r, \Omega) = \int_0^\infty J(r, E, \Omega) dE = \int_0^\infty \Omega \varphi(r, E, \Omega) dE = \Omega \varphi(r, \Omega)$ $1/(\text{см}^2 \cdot \text{с} \cdot \text{ср})$ (1.19)	$J_k(r, \Omega) = J(r, \Omega) \mathbf{k} = \varphi(r, \Omega) (\Omega \cdot \mathbf{k}) = \varphi(r, \Omega) \cos(\Omega, \mathbf{k})$ $1/(\text{см}^2 \cdot \text{с} \cdot \text{ср})$ (1.24)
Пространственно-энергетическая ²	$\varphi(r, E) = \int_{4\pi} \varphi(r, E, \Omega) d\Omega$ $1/(\text{см}^2 \cdot \text{с} \cdot \text{МэВ})$ (1.15)	$J(r, E) = \int_{4\pi} J(r, E, \Omega) d\Omega = \int_{4\pi} \Omega \varphi(r, E, \Omega) d\Omega$ $1/(\text{см}^2 \cdot \text{с} \cdot \text{МэВ})$ (1.20)	$J_k(r, E) = J(r, E) \mathbf{k} = \int_{4\pi} \varphi(r, E, \Omega) (\Omega \cdot \mathbf{k}) d\Omega = \int_{4\pi} \varphi(r, E, \Omega) \times \cos(\Omega, \mathbf{k}) d\Omega$ $1/(\text{см}^2 \cdot \text{с} \cdot \text{МэВ})$ (1.25)
Пространственная ⁴	$\varphi(r) = \int_{4\pi} \varphi(r, \Omega) d\Omega = \int_0^\infty \varphi(r, E) dE$ $1/(\text{см}^2 \cdot \text{с})$ (1.16)	$J(r) = \int_{4\pi} J(r, \Omega) \times d\Omega = \int_{4\pi} \Omega \varphi(r, \Omega) \times d\Omega$ $1/(\text{см}^2 \cdot \text{с})$ (1.21)	$J_k(r) = J(r) \mathbf{k} = \int_{4\pi} \varphi(r, \Omega) (\Omega \cdot \mathbf{k}) d\Omega = \int_{4\pi} \varphi(r, \Omega) \cos(\Omega, \mathbf{k}) d\Omega$ $1/(\text{см}^2 \cdot \text{с})$ (1.26)

¹ Для каждой характеристики поля приведены предпочтительные единицы с использованием для энергетических характеристик внесистемной десятичной кратной единицы энергии мегаэлектрон-вольт, допущенной к применению наравне с единицами СИ без ограничения срока.

² Величины $\varphi(r, E)$, $J(r, E)$, $J_k(r, E)$ для фиксированной точки пространства r называются энергетическими спектрами ионизирующего излучения по плотности потока частиц, по плотности тока частиц, по плотности скалярного тока частиц соответственно.

³ Формула записана для определения поля изотропных детекторов.

⁴ Величины $\varphi(r)$, $J(r)$, $J_k(r)$ для фиксированной точки пространства r называются плотностью потока частиц, плотностью тока частиц, плотностью скалярного тока частиц соответственно.

в пространстве будем определять единичным вектором \mathbf{k} , перпендикулярным ее поверхности (рис. 1.2, б). Эту величину будем называть скалярным током.

Тогда пространственно-временную энергетическо-угловую плотность скалярного тока частиц через произвольную площадку dS_k , расположенную перпендикулярно вектору \mathbf{k} (рис. 1.2, б), $J_k = (r, t, E, \Omega)$ можно определить как отношение числа ионизирующих частиц dN с энергией от E до $E + dE$, распространяющихся в направлении, определенном элементарным телесным углом $d\Omega$, содержащим данное направление Ω , и пересекающих в момент времени t за интервал времени dt элементарную площадку dS_k , центрированную в рассматриваемой точке поля r , нормаль к которой совпадает с направлением единичного вектора \mathbf{k} , к площади элементарной площадки dS_k , к интервалу времени dt , к энергетическому интервалу dE и к элементарному телесному углу $d\Omega$.

Пространственно-временная энергетическо-угловая плотность скалярного тока частиц $J_k(r, t, E, \Omega)$ связана с $\varphi(r, t, E, \Omega)$ очевидным соотношением

$$J_k(r, t, E, \Omega) = \varphi(r, t, E, \Omega) \frac{dS}{dS_k} = \varphi(r, t, E, \Omega) \cos(\Omega, \mathbf{k}). \quad (1.11)$$

Нетрудно показать, что $J_k(r, t, E, \Omega)$ — проекция вектора $J(r, t, E, \Omega)$ на направление вектора \mathbf{k} . Действительно,

$$J_k(r, t, E, \Omega) = J(r, t, E, \Omega) \mathbf{k} = \varphi(r, t, E, \Omega) \Omega \mathbf{k} = \varphi(r, t, E, \Omega) \cos(\Omega, \mathbf{k}). \quad (1.12)$$

Следовательно, понятие пространственно-временной энергетическо-угловой плотности скалярного тока частиц $J_k(r, t, E, \Omega)$ тождественно проекции пространственно-временной энергетическо-угловой плотности тока частиц $J(r, t, E, \Omega)$ на направление вектора \mathbf{k} , расположенного нормально к площадке dS_k .

Таким образом, при расчете плотности скалярного тока частиц каждая частица учитывается со своим весовым множителем, который зависит от угла, образуемого вектором скорости частицы Ω с вектором направления \mathbf{k} , и равняется $\cos(\Omega, \mathbf{k})$.

Пространственно-временную энергетическо-угловую плотность скалярного тока энергии частиц обозначают

$$J_{E_k}(r, t, E, \Omega) = E J_k(r, t, E, \Omega) \quad (1.13)$$

В наиболее общем виде пространственно-временные энергетическо-угловые характеристики поля ионизирующих излучений зависят от семи переменных: трех пространственных координат, определяющих положение радиуса-вектора r , двух углов, характеризующих направление единичного вектора Ω , энергии и времени.

Для рассмотренных ниже стационарных по времени задач зависимость характеристик поля излучения от времени t исключается из рассмотрения.

Во многих практических стационарных по времени задачах часто требуется знать менее детальные характеристики поля излучения, которые сравнительно легко можно получить в экспериментах. В таких случаях используют приводимые в табл. 1.8 функционалы величин $\varphi(r, E, \Omega)$. Названия приведенных в этой таблице дифференциальных и интегральных характеристик поля излучения формируются из наиме-

* Заметим, что термин «скалярный ток» не является строгим, но удобен для практического использования.

нований зависимости характеристики и вида регистрируемого эффекта. Например, формулой (1.14) в табл. 1.8 определяется пространственно-угловая зависимость плотности потока частиц.

В таблице для краткости рассмотрены характеристики только по числу частиц. Аналогичные формулы можно было бы записать и для энергии частиц.

Интегрирование угловых характеристик тока в табл. 1.8 сводится к суммированию векторов по правилам векторной алгебры, при этом направления результирующих векторов $J(r, E)$ и $J(r)$ в общем случае заранее не известны, их можно определить, зная лишь соответственно функции $\varphi(r, E, \Omega)$ и $\varphi(r, \Omega)$. Результирующий вектор определяет направление тока в данной точке пространства r через единичную площадку, перпендикулярную его направлению. Для задач, в которых поле излучения симметрично относительно оси, проходящей через r , результирующий вектор всегда направлен по этой оси.

Заметим, что модуль плотности тока или скалярный ток излучения меньше плотности потока излучения. Исключением является случай мононаправленного пучка излучения, когда модуль плотности тока (в направлении распространения излучения) совпадает с плотностью потока.

Характеристики поля, аргументами которых являются энергия E и направление движения частиц Ω , называются дифференциальными. Если E и Ω не являются аргументами характеристики поля, то она называется интегральной. Однако обычно для простоты слова «дифференциальный» и «интегральный» опускают, так как указание аргументов у соответствующих величин ясно показывает, какая характеристика имеется в виду. Таким образом, характеристики поля излучения могут задаваться в потоковых величинах, токовых величинах и величинах скалярного тока.

Следующий пример показывает существенную разницу в этих величинах.

Пример. Определить плотность потока частиц, плотность тока частиц и плотность скалярного тока частиц через единичную площадку S_k , нормаль к которой совпадает с направлением вектора k в точке пространства r , где «сходятся» три мононаправленных пучка частиц, ориентированных в пространстве, как показано на рис. 1.3. Плотность потока частиц в направлении единичного вектора Ω_1 составляет $\varphi_1 = 1 \cdot 10^8$ част./ $(\text{см}^2 \cdot \text{с})$, в направлении Ω_2 $\varphi_2 = 4 \cdot 10^7$ част./ $(\text{см}^2 \cdot \text{с})$ в направлении Ω_3 $\varphi_3 = 4 \cdot 10^7$ част./ $(\text{см}^2 \cdot \text{с})$.

Решение. Плотность потока частиц в точке пространства r $\varphi_{1,2,3} = \varphi_1 + \varphi_2 + \varphi_3 = 1 \cdot 10^8 + 4 \cdot 10^7 + 4 \cdot 10^7 = 1,8 \cdot 10^8$ част./ $(\text{см}^2 \cdot \text{с})$.

Для определения плотности тока частиц сложим векторы $\Omega_1\varphi_1 + \Omega_2\varphi_2 + \Omega_3\varphi_3$. Сложение векторов $\Omega_2\varphi_2 + \Omega_3\varphi_3$ осуществляется по правилу параллелограмма. Модуль результирующего вектора $|\Omega_2\varphi_2 + \Omega_3\varphi_3| = 4 \cdot 10^7$ част./ $(\text{см}^2 \cdot \text{с})$. Сумма векторов $\Omega_1\varphi_1$ и $\Omega_2\varphi_2 + \Omega_3\varphi_3$, направленных в противоположные стороны, равна результирующему вектору $\Omega_{1+2+3}\varphi_{1+2+3}$, расположенному нормально к единичной площадке S_{1+2+3} и направленному в сторону вектора Ω_1 . Модуль результирующего вектора тока $|\Omega_{1+2+3}\varphi_{1+2+3}| = 1 \cdot 10^8 - 4 \cdot 10^7 = 6 \cdot 10^7$ част./ $(\text{см}^2 \cdot \text{с})$.

Плотность скалярного тока частиц через единичную площадку S_k $J_{k,1+2+3} = \varphi_1 \cos(\Omega_1, k) + \varphi_2 \cos(\Omega_2, k) + \varphi_3 \cos(\Omega_3, k) = 1 \cdot 10^8 \cos 90^\circ + 4 \cdot 10^7 \cos 30^\circ + 4 \cdot 10^7 \times \cos 150^\circ = 1 \cdot 10^8 \cos 90^\circ + 4 \cdot 10^7 \cdot 0,866 - 4 \cdot 10^7 \cdot 0,866 = 0$.

Если вспомним, что $J_{k,1+2+3}$ — проекция плотности тока частиц J_{1+2+3} на направление вектора k , то можно записать $J_{k,1+2+3} = J_{1+2+3} k = \varphi_{1+2+3} \cos(\Omega_{1+2+3}, k) = 1,8 \cdot 10^8 \cos 90^\circ = 0$. Естественно, мы пришли к тому же результату для $J_{k,1+2+3}$.

В заключение сформулируем определение наиболее часто используемых интегральных потоковых характеристик поля излучения.

Поток ионизирующих частиц — отношение числа ионизирующих частиц dN , падающих на данную поверхность за интервал времени dt , к этому интервалу: $\Phi = dN/dt$.

Поток энергии ионизирующих частиц — отношение суммарной энергии (исключая энергию покоя) dW всех ионизирующих частиц, падающих на данную поверхность за интервал времени dt , к этому интервалу: $\Phi_E = dW/dt$.

Плотность потока ионизирующих частиц — отношение потока ионизирующих частиц $d\Phi$, проникающих в объем элементарной сферы, к площади центрального поперечного сечения dS этой сферы: $\varphi = d\Phi/dS = dN/(dSdt)$.

Плотность потока энергии ионизирующих частиц — отношение потока энергии ионизирующих частиц $d\Phi_E$, проникающих в объем элементарной сферы, к площади центрального поперечного сечения dS этой сферы: $l = d\Phi_E/dS = dW/(dSdt)$.

Флюенс ионизирующих частиц — отношение числа ионизирующих частиц dN , проникающих в объем элементарной сферы, к площади центрального поперечного сечения dS этой сферы: $\Phi = dN/dS$.

Флюенс энергии ионизирующих частиц — отношение суммарной энергии (исключая энергию покоя) dW всех ионизирующих частиц, проникающих в объем элементарной сферы, к площади центрального поперечного сечения dS этой сферы: $\Phi_W = dW/dS$.

§ 1.5. ДОЗИМЕТРИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОЛЯ ИЗЛУЧЕНИЯ

Знание пространственно-временной энергетическо-угловой плотности потока частиц $\varphi(r, t, E, \Omega)$ позволяет в любой точке пространства r в момент времени t рассчитать любую дозиметрическую характеристику поля излучения.

Условно можно выделить два класса дозиметрических величин [7, 8]:

1. **Базисные величины**, определяемые в исходном поле, свободном от каких-либо возмущений, т. е. когда в поле излучения не вносится каких-либо возмущений, например присутствием в поле тела человека или соответствующих ему моделей (биологических фантомов), разрабо-

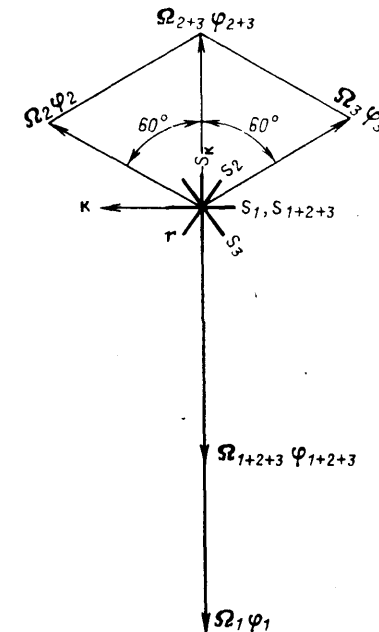


Рис. 1.3. К примеру на стр. 20.

таных в разных приближениях. Характерная базисная величина — экспозиционная доза. Такие дозиметрические величины, как поглощенная доза, керма, эквивалентная доза, могут быть также базисными, если они определены в невозмущенном исходном поле излучения. Эти базисные величины относятся к элементарному объему вещества, помещенного в точку определения дозиметрической величины, не искажающему исходное поле. Таким образом, базисные дозиметрические величины полностью определяются характеристиками исходного невозмущенного поля излучения.

2. *Фантомные величины* формируются в результате возмущения исходного радиационного поля помещением в него фантома. Эти величины относятся к заданной точке детектирования внутри фантома или на его поверхности и определяются не только характеристиками исходного поля излучения, но также и всеми параметрами фантома (геометрия, размеры, состав¹⁾). Наиболее широко используются для исследований следующие гомогенные тканезквивалентные фантомы: 1) слой толщиной 30 см с бесконечными поперечными размерами; 2) цилиндр диаметром 30 и высотой 60 см; 3) сфера диаметром 30 см.

Основной физической величиной, определяющей степень радиационного воздействия, является поглощенная доза ионизирующего излучения.

Поглощенная доза ионизирующего излучения D — отношение средней энергии $d\bar{W}$, переданной ионизирующим излучением веществу в элементарном объеме, к массе dm вещества в этом объеме:

$$D = \frac{d\bar{W}}{dm} \quad (1.27)$$

ГОСТ допускает вместо термина «поглощенная доза излучения» использовать краткую форму *доза излучения*.

Единица поглощенной дозы в СИ — *грей* (Гр)² Грей равен поглощенной дозе ионизирующего излучения, при которой веществу массой 1 кг передается энергия ионизирующего излучения, равная 1 Дж.

Внесистемной единицей поглощенной дозы ионизирующего излучения является *рад* (рад). Рад равен поглощенной дозе ионизирующего излучения, при которой веществу массой 1 г передается энергия ионизирующего излучения, равная 100 эрг. Таким образом, 1 рад = 0,01 Гр.

Сделаем несколько пояснений к определению поглощенной дозы.

1. Под переданной энергией в определении поглощенной дозы понимается разность между суммарной кинетической энергией всех заряженных и незаряженных частиц, входящих в рассматриваемый объем, и суммарной кинетической энергией всех заряженных и незаряженных частиц, выходящих из этого объема. Если в рассматриваемом объеме вещества имелись превращения атомных ядер и (или) элементарных частиц, то к указанной выше разности прибавляется разность между суммой всех выделенных энергий и суммой всех затраченных энергий при любых превращениях атомных ядер и (или) элементарных частиц, имевших место в данном объеме вещества.

2. Если подходить строго, следует различать *переданную энергию* и *поглощенную энергию* излучения, которая представляет собой полную

¹ Плотность и химический состав тканезквивалентных веществ приводятся в приложении (табл. П. 5).

² Луис Гарольд Грей (1905—1965 гг.) — известный английский физик и радиобиолог, сделал фундаментальное открытие в области радиационной дозиметрии, известное в настоящее время как принцип Брегга-Грея.

энергию излучения, потерянную полем при взаимодействиях. Эти две величины равны между собой, если в рассматриваемом объеме не происходит изменения энергий за счет превращения атомных ядер и (или) элементарных частиц. Это условие справедливо во многих задачах. Так как в этих случаях понятия поглощенной и переданной энергии идентичны, различием между ними при этом вообще пренебрегают.

3. В биологическом фантоме поглощенная доза излучения распределяется неравномерно. Распределение ее в фантоме для косвенно ионизирующих излучений определяется накоплением вторичных заряженных частиц и ослаблением первичного излучения источника с увеличением глубины фантома. Конкуренция этих двух процессов может приводить к появлению заметного максимума в распределении внутри фантома. Степень воздействия излучения при облучении принято характеризовать *максимальными значениями доз облучения* $D_{\text{макс}}$ в теле человека. Использование этих значений доз исключает превышение допустимой дозы в любой точке тела человека. Слово «максимальный» обычно для краткости опускают.

4. Обратим внимание, что в определении поглощенной дозы указана *средняя переданная излучением веществу энергия* $d\bar{W}$. Переданная энергия подвержена случайным статистическим флуктуациям, которые могут стать значительными, если масса dm мала или невелик флюенс заряженных частиц. Такие величины, подверженные статистическим флуктуациям, называют стохастическими. Таким образом, $d\bar{W}$ — стохастическая величина. Ее ожидаемое значение называют средней переданной энергией $d\bar{W}$, которая является в свою очередь нестохастической величиной. Следовательно, и *поглощенная доза — величина нестохастическая, определенная как среднее значение связанной с ней стохастической величины*.

5. В формуле (1.27) и в других подобных случаях выше и ниже в тексте, как общепринято в физике, под $d\bar{W}$ понимают дифференциал ожидаемого значения средней энергии \bar{W} . При этом дифференциал в знаменателе, с одной стороны, мал по сравнению с изменением (градиентом) поля излучения, с другой стороны, достаточно велик, чтобы можно было бы зарегистрировать достаточно большую энергию.

6. Заметим, что определение поглощенной дозы, как и других характеристик поля излучения, математически строго можно записать через предельные переходы. Тогда вместо формулы (1.27) запишем

$$D = \lim_{\Delta m \rightarrow 0} \frac{\Delta \bar{W}}{\Delta m} \quad (1.28)$$

Недавно была введена новая величина — *полевая поглощенная доза* [5]. *Полевая поглощенная доза* D_p — поглощенная доза в центре шара радиусом в 1 г/см² из рассматриваемого вещества, совмещенном с точкой поля ионизирующего излучения, в которой определяется D_p . В качестве рабочего вещества, если не оговаривается иное, используют вещества, эквивалентные мягкой биологической ткани стандартного состава (табл. П.5). Радиус 1 г/см² для биологической ткани ($\rho = 1 \text{ г/см}^3$) эквивалентен 10 мм — минимальной глубине залегания основных критических органов.

Для оценки воздействия на среду косвенно ионизирующих излучений часто используют понятие керма (kerma — аббревиатура от английских слов kinetic energy released in material).

Керма K — отношение суммы первоначальных кинетических энергий dW_K всех заряженных ионизирующих частиц, образованных под действием косвенно ионизирующего излучения в элементарном объеме вещества, к массе dm вещества в этом объеме:

$$K = \frac{dW_K}{dm} \quad (1.29)$$

В качестве вещества, в котором определяется керма, часто используют воздух для фотонного излучения, биологическую ткань для косвенно ионизирующих излучений — в задачах медицины и биологии, и любой материал — при изучении радиационных эффектов.

Единица кермы — *грей* (Гр) совпадает с единицей поглощенной дозы.

Грей равен керме, при которой сумма начальных кинетических энергий всех заряженных ионизирующих частиц, образовавшихся под действием косвенно ионизирующего излучения в веществе массой 1 кг, равна 1 Дж.

Внесистемная единица кермы — *рад* (рад).

Керма определяется кинетической энергией вторичных заряженных частиц, в том числе и той ее частью, которая расходуется затем на тормозное излучение. Таким образом, керма для моноэнергетического пучка фотонного излучения может быть представлена в виде суммы двух членов:

$$K = K_1 + K_2 = \mu_{en,m} \Phi_{\Psi} + (\mu_{tr,m} - \mu_{en,m}) \Phi_{\Psi} = \mu_{tr,m} \Phi_{\Psi}, \quad (1.30)$$

где K_1 — компонента кермы, обусловленная кинетической энергией заряженных частиц, затраченной на ионизацию и возбуждение при взаимодействии (столкновении) частиц первичного излучения с атомами среды; K_2 — компонента кермы, обусловленная кинетической энергией заряженных частиц, затраченной на тормозное излучение; $\mu_{en,m}$, $\mu_{tr,m}$ — массовые коэффициенты поглощения энергии и передачи энергии фотонного излучения соответственно; Φ_{Ψ} — флюенс энергии излучения.

Определим долю энергии вторичных заряженных частиц $g = K_2/K$, переходящую в тормозное излучение. Учитывая, что $\mu_{en} = \mu_{tr}(1-g)$, нетрудно определить

$$g = K_2/K = (\mu_{tr} - \mu_{en})/\mu_{tr}. \quad (1.31)$$

Из зависимости g от энергии фотонного излучения и атомного номера Z материала (рис. 1.4) видно, что для фотонов средних энергий и легкоатомных сред (воздух, вода) K_2/K незначительно. Заметим, что для тяжелых сред значение g может стать достаточно большим.

Следовательно, значение кермы для фотонов в условиях электронного равновесия совпадает с поглощенной дозой с погрешностью, определяемой значением g .

Для энергий фотонов радионуклидных источников ($E_0 \lesssim 3$ МэВ) значение кермы в воздухе может превышать значение поглощенной дозы в воздухе примерно не более чем на 1% (рис. 1.4), например, для ^{60}Co это расхождение примерно 0,5%. Следовательно, в этих задачах с погрешностью до 1%, меньшей погрешности определения коэффициентов взаимодействия фотонов с веществом ($\pm 2\%$), поглощенная доза в воздухе и керма в воздухе равны.

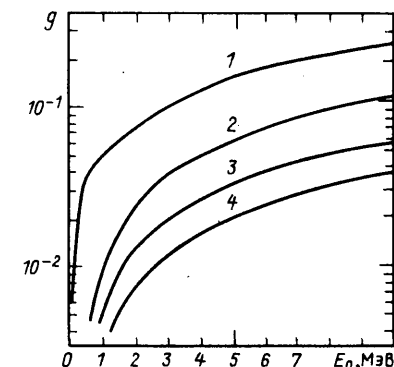


Рис. 1.4. Зависимость g от энергии фотонов для разных сред:

1 — Pb; 2 — Fe; 3 — Al; 4 — воздух ($Z_{\text{эф}} = 7,64$)

Керма в биологической ткани с глубиной из-за ослабления первичного излучения в ткани уменьшается. Таким образом, максимум кермы наблюдается на поверхности ткани.

Сравним теперь характеристики поля излучения по поглощенной дозе и керме для источников нейтронов, для которых первоначально и была введена керма.

Керма нейтронов совпадает с поглощенной дозой от вторичных заряженных частиц в условиях их равновесия. Для ткани достаточно большой массы и в биологической защите, где соблюдается условие равновесия заряженных частиц, керма обычно практически* совпадает с поглощенной дозой от вторичных заряженных частиц; для тонких слоев, таких, как кожный покров и материал одежды, эти дозиметрические характеристики различаются.

Для нейтронов в условиях равновесия заряженных частиц поглощенная доза практически может быть представлена как сумма кермы и поглощенной дозы от вторичного γ -излучения. Поэтому керма на единичный флюенс меньше поглощенной дозы на единичный флюенс, особенно в области промежуточных энергий, где значителен вклад в поглощенную дозу от вторичного γ -излучения.

Часто бывает необходимо при решении практических задач определять керму для конкретного вещества (например, воздуха), находящегося в некоторой точке внутри других веществ (например, в водном фантоме). В таких случаях оговаривают материал, для которого определяют керму, и среду, в которую он помещен, например керма в воздухе (или воздушная керма) в заданной точке внутри водного фантома.

Для оценки поля фотонного излучения при использовании внесистемных единиц применяли понятие экспозиционной дозы.

Экспозиционная доза X — это количественная характеристика фотонного излучения, которая основана на его ионизирующем действии в сухом атмосферном воздухе и представляет собой отношение суммарного заряда dQ всех ионов одного знака, созданных в воздухе, когда

* Здесь и далее слово «практически» напоминает, что утверждение справедливо, если можно пренебречь потерями энергии заряженных частиц на образование тормозного излучения.

все электроны и позитроны, освобожденные фотонами в элементарном объеме воздуха с массой dm , полностью остановились в воздухе, к массе воздуха в указанном объеме dm :

$$X = \frac{dQ}{dm}. \quad (1.32)$$

Понятие экспозиционной дозы рекомендовано для фотонного излучения с энергией до 3 МэВ. Вследствие близости эффективных атомных номеров воздуха и ткани воздух для фотонного излучения принято считать тканезквивалентной средой.

Единица экспозиционной дозы в СИ — *кулон на килограмм* (Кл/кг).

Кулон на килограмм равен экспозиционной дозе, при которой все электроны и позитроны, освобожденные фотонами в воздухе массой 1 кг, производят в воздухе ионы, несущие электрический заряд 1 Кл каждого знака.

Имея в виду отказ от экспозиционной дозы в переходный период [5], эта величина приводится в литературе только во внесистемных единицах.

Внесистемная единица экспозиционной дозы — *рентген* (Р)*. Рентген — это единица экспозиционной дозы фотонного излучения, при прохождении которого через 0,001293 г воздуха в результате завершения всех ионизационных процессов в воздухе создаются ионы, несущие одну электростатическую единицу количества электричества каждого знака. Заметим, что 0,001293 г — это масса 1 см³ атмосферного сухого воздуха при нормальных условиях [температура 0 °С и давление 1013 гПа (760 мм рт. ст.)].

Соотношение внесистемной единицы и единицы СИ:

$$1 \text{ Р} = 2,58 \cdot 10^{-4} \text{ Кл/кг (точно).}$$

Экспозиционная доза не учитывает ионизацию, обусловленную тормозным излучением электронов и позитронов: этой величиной для воздуха обычно можно пренебречь ввиду ее малости (рис. 1.4).

В условиях равновесия заряженных частиц и пренебрежения энергией электронов и позитронов, затрачиваемой на образование тормозного излучения, энергетические эквиваленты кермы в воздухе и экспозиционной дозы одинаковы.

Из определения единиц экспозиционной дозы нетрудно найти их энергетические эквиваленты.

Принимая заряд одного иона равным $1,602 \cdot 10^{-19}$ Кл, получим, что при наличии равновесия заряженных частиц при экспозиционной дозе 1 Кл/кг в 1 кг воздуха создается $1/1,602 \cdot 10^{-19} = 6,24 \cdot 10^{18}$ пар ионов.

Введем понятие *средней энергии ионообразования* w_0 как отношение начальной кинетической энергии E_0 заряженной ионизирующей частицы к числу пар ионов N , образованных этой частицей до полной потери ее кинетической энергии в данном веществе: $w_0 = E_0/N$.

Принимая среднюю энергию образования одной пары ионов равной 33,85 эВ [16], получаем *энергетические эквиваленты кулона на килограмм*: 1 Кл/кг = $6,24 \cdot 10^{18}$ пар ионов на 1 кг воздуха → $2,11 \cdot 10^{14}$ МэВ

* Названа в честь Вильгельма Конрада Рентгена (1845—1923 гг.) — немецкого физика, который открыл излучение, названное его именем, и создал рентгеновские трубки.

на 1 кг воздуха → 33,85 Дж на 1 кг воздуха → $8,07 \cdot 10^{18}$ пар ионов на 1 м³ воздуха → $2,73 \cdot 10^{14}$ МэВ на 1 м³ воздуха → 43,77 Дж на 1 м³ воздуха при нормальных условиях.

Принимая заряд одного иона равным $4,803 \cdot 10^{-10}$ СГСЕ и зная w_0 , нетрудно определить и *энергетические эквиваленты рентгена*: 1 Р = $1,61 \cdot 10^{12}$ пар ионов на 1 г воздуха → $5,45 \cdot 10^7$ МэВ на 1 г воздуха → $8,73 \cdot 10^{-6}$ Дж на 1 г воздуха → 87,3 эрг на 1 г воздуха → $2,08 \cdot 10^9$ пар ионов на 1 см³ воздуха → $7,05 \cdot 10^4$ МэВ на 1 см³ воздуха → $1,13 \cdot 10^{-8}$ Дж на 1 см³ воздуха → 0,113 эрг на 1 см³ воздуха при нормальных условиях.

В условиях лучевого равновесия заряженных частиц экспозиционной дозе в 1 Кл/кг соответствует поглощенная доза 33,85 Гр в воздухе или 36,9 Гр в биологической ткани, внесистемной единице 1 Р соответствует поглощенная доза 0,873 рад в воздухе или 0,95 рад в биологической ткани. Поэтому с погрешностью до 5 % экспозиционную дозу в рентгенах и поглощенную дозу в ткани в радах можно считать совпадающими.

Как отмечалось выше, в процессе перехода на единицы СИ экспозиционная доза подлежит изъятию из употребления [5]. Укажем на некоторые причины такого решения. Экспозиционная доза была введена только для фотонного излучения, поэтому она не может использоваться в полях часто встречающегося на практике смешанного излучения. Даже и для фотонного излучения область практического использования этой величины ограничена энергией 3 МэВ. Значения экспозиционной дозы в рентгенах и поглощенной дозы в воздухе в радах различаются во внесистемных единицах всего лишь в 1,14 раза. Существенное изменение размеров единиц при переходе на единицы СИ и нецелочисленный неудобный коэффициент связи между внесистемными единицами и единицами СИ могут быть причинами многочисленных ошибок.

Для оценки биологического эффекта воздействия излучения произвольного состава потребовалось введение новой характеристики дозы.

Для сравнения биологических эффектов, производимых одинаковой поглощенной дозой различных видов излучений, используют понятие *относительная биологическая эффективность излучения* (ОБЭ).

Под ОБЭ излучения понимают отношение поглощенной дозы образцового рентгеновского излучения (непрерывный энергетический спектр с граничной энергией 180 кэВ) к поглощенной дозе данного рассматриваемого вида излучения, вызывающих одинаковый биологический эффект.

Коэффициент качества представляет собой регламентированное значение ОБЭ, установленное для контроля степени радиационной опасности при хроническом облучении. Безразмерная единица коэффициента качества — *зиверт на грей*. Этот коэффициент определяет зависимость неблагоприятных биологических последствий облучения человека в малых дозах от полной линейной передачи энергии (ЛПЭ) излучения.

Зависимость коэффициента качества излучения k от полной ЛПЭ решением Национальной комиссии по радиационной защите СССР (НКРЗ) установлена [5] в виде соотношения

$$k(L) = \frac{1}{2,31 \cdot 10^{-4} L} [1 - \exp(-2,14 \cdot 10^{-4} L - 4,75 \cdot 10^{-5} L^2)], \quad (1.33)$$

где L — ЛПЭ мягкой биологической ткани стандартного состава, кэВ/мкм, а также дискретными значениями, приведенными в табл. 1.9.

Таблица 1.9

Зависимость коэффициента качества k от ЛПЭ

ЛПЭ, кэВ/мкм	k , Зв/Гр	ЛПЭ, кэВ/мкм	k , Зв/Гр	ЛПЭ, кэВ/мкм	k , Зв/Гр
0,4	1	20	5	430	10
3	1,5	47	10	870	5
10	3	155	20	4300	1
				и более	и менее

Среднее значение коэффициента качества излучения определяется по формуле

$$\bar{k} = \frac{1}{D} \int_0^{\infty} \frac{dD(L)}{dL} k(L) dL, \quad (1.34)$$

где $dD(L)/dL$ — распределение поглощенной дозы D по полной линейной передаче энергии L ; $k(L)$ — приведенная выше зависимость.

Если спектр излучения в шкале ЛПЭ неизвестен, но известны состав и энергетические спектры отдельных компонент излучения, то для определения значения \bar{k} можно использовать значения коэффициентов качества для разных видов излучения и энергий (табл. 1.10) [10].

При еще более ограниченных сведениях о составе излучения можно использовать средние значения коэффициента качества \bar{k} , приведенные в табл. 1.11 [5].

Таблица 1.10

Коэффициенты качества для разных видов ионизирующих излучений k , Зв/Гр

Фотоны		Нейтроны		Электроны		β-Излучение*		Протоны	
E_0 , МэВ	k	E_0 , МэВ	k	E_0 , МэВ	k	E_0 , МэВ	k	E_0 , МэВ	k
$5 \cdot 10^{-3}$	2,6	Тепловые	2,9	$1 \cdot 10^{-1}$	1,1	0,2	1,1	2	13,5
$1 \cdot 10^{-2}$	1,8	$1 \cdot 10^{-7}$	2,4	$\geq 2 \cdot 10^{-1}$	1,0	0,3	1,1	5	11,7
$2 \cdot 10^{-2}$	1,4	$1 \cdot 10^{-6}$	1,9			0,4	1,1	10	9,4
$3 \cdot 10^{-2}$	1,5	$1 \cdot 10^{-5}$	1,7			0,5	1,1	20	7,0
$5 \cdot 10^{-2}$	1,7	$1 \cdot 10^{-4}$	1,7			$\geq 0,7$	1,0	50	4,7
$1 \cdot 10^{-1}$	1,5	$5 \cdot 10^{-3}$	2,8						
$2 \cdot 10^{-1}$	1,2	$2 \cdot 10^{-2}$	4,9						
$5 \cdot 10^{-1}$	1,1	$1 \cdot 10^{-1}$	8,0						
≥ 1	1,0	$5 \cdot 10^{-1}$	12						
		1	12						
		2,5	10						
		5	8,4						
		10	6,7						
		20	5,4						

* Для кожи как критического органа.

Таблица 1.11

Средние значения коэффициента качества \bar{k} , Зв/Гр

Вид ионизирующего излучения	\bar{k}	Вид ионизирующего излучения	\bar{k}
Фотоны с энергией более 350 кэВ	1,0	Нейтроны с энергией более 100 МэВ	5,0
Фотоны с энергией 150—350 кэВ	1,5	Нейтроны с энергией 0,03—100 МэВ	10
Фотоны с энергией менее 150 кэВ	2,0	Нейтроны с энергией менее 30 кэВ	3,0
Электроны и позитроны с энергией более 100 кэВ	1,0	Протоны с энергией более 50 МэВ ^{*1}	2,5
Бета-излучение с граничной энергией более 200 кэВ ^{*1}	1,0	Протоны с энергией более 5 МэВ ^{*2}	2,5
		Альфа-излучение с энергией менее 6 МэВ	20
		Тяжелые ядра	20

*¹ При облучении тела на глубине 1 см и более.

*² При облучении кожи.

Заметим, что обычно в практических расчетах для фотонов, электронов, позитронов и β-частиц коэффициент качества принимается равным единице.

В задачах радиационной безопасности при хроническом облучении человека в малых дозах (в дозах, не превышающих пяти предельно допустимых годовых доз при облучении всего тела человека) основной величиной для оценки биологического действия излучения любого состава является эквивалентная доза.

Эквивалентная доза ионизирующего излучения H — произведение поглощенной дозы D на средний коэффициент качества излучения \bar{k} в данном объеме биологической ткани стандартного состава:

$$H = \bar{k}D. \quad (1.35)$$

Единица эквивалентной дозы СИ — *зиверт* (Зв)^{*1}.

Зиверт равен эквивалентной дозе, при которой произведение поглощенной дозы в биологической ткани стандартного состава на средний коэффициент качества равно 1 Дж/кг.

Единица зиверт имеет одинаковую размерность с единицей грей — L^2T^{-2} ^{*2}. Однако это единицы разных физических величин. 1 Дж/кг = 1 Гр лишь применительно к поглощенной дозе или керме, а 1 Дж/кг = 1 Зв, когда определяют размер эквивалентной дозы.

Внесистемная изымаемая из обращения единица эквивалентной дозы — *бэр* (биологический эквивалент рада). Бэр равен эквивалент-

*¹ Рольф Зиверт — известный шведский ученый, внесший большой вклад в различные области радиационной безопасности, в исследования естественного γ-излучения.

*² Имеются и другие примеры, когда разные физические величины имеют одинаковую размерность. Например, размерность единицы активности беккерель и единицы частоты периодического процесса герц совпадают и равны T^{-1} .

ной дозе, при которой произведение поглощенной дозы в биологической ткани стандартного состава на средний коэффициент качества равно 100 эрг/г.

Таким образом, 1 бэр = 0,01 Зв.

В качестве биологической ткани стандартного состава обычно принимают ткань из четырех компонентов с массовым составом, рекомендованным МКРЕ, %: O — 76,2; C — 11,1; H — 10,1; N — 2,6. При более точных расчетах надо учитывать, что в состав ткани входят также Ca, P, S, K и другие компоненты с суммарным массовым вкладом около 3% (табл. П.5).

Как отмечалось выше, для фантомных характеристик обычно пользуются максимальной эквивалентной дозой H_{\max} — наибольшим значением эквивалентной дозы в организме человека (в критическом органе).

В качестве альтернативной величины, определяемой по максимальной эквивалентной дозе в организме человека, предложен показатель эквивалентной дозы (ПЭД). ПЭД в данной точке есть максимальное значение эквивалентной дозы в сфере диаметром 30 см с центром в данной точке, наполненной тканеэквивалентным материалом плотностью 1 г/см³.

В последние годы входит в практику еще одна альтернативная фантомная характеристика эквивалентной дозы — AMBIENT DOSE $H^*(10)$.

Амбиентная эквивалентная доза — эквивалентная доза, создаваемая в шаре диаметром 30 см из тканеэквивалентного материала плотностью 1 г/см³ на глубине 10 мм от поверхности по радиусу, параллельному, но противоположно направленному по отношению к однородному направленному полю излучения (рис. 1.5, а).

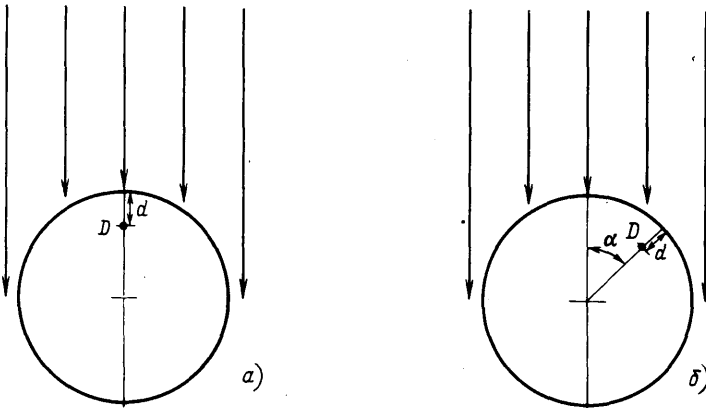


Рис. 1.5. К определению амбиентной эквивалентной дозы

При отклонении радиуса с точкой детектирования от направления распространения излучения (угол α) мы приходим к измерению величины $H'(10, \alpha)$ в геометрии рис. 1.5, б. Угловая зависимость $H'(10, \alpha)/H^*(10)$ для разных моноэнергетических источников фотонов и нейтронов показана на рис. 1.6 [17] и 1.7 [18].

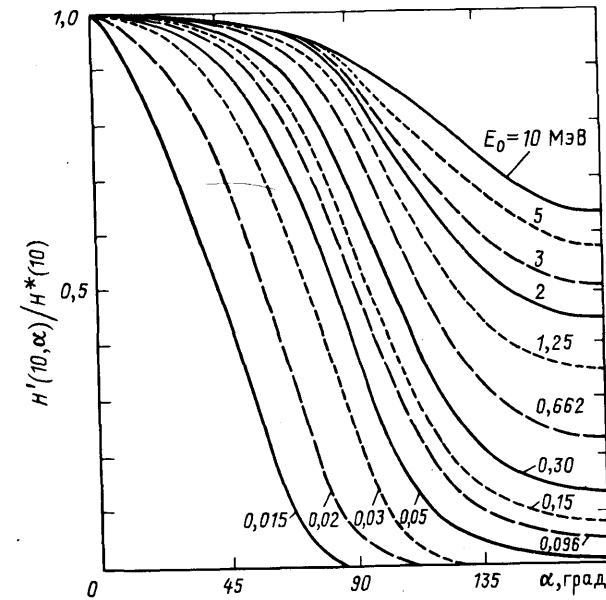


Рис. 1.6. Угловая зависимость отношения $H'(10, \alpha)/H^*(10)$ для фотонов разных энергий [17]

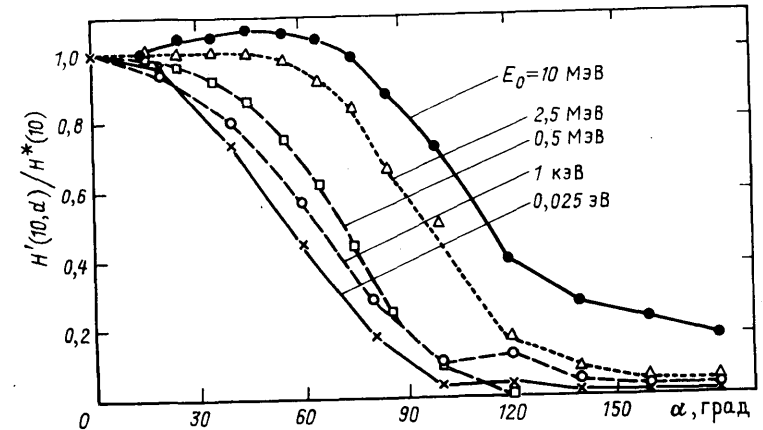


Рис. 1.7. Угловая зависимость отношения $H'(10, \alpha)/H^*(10)$ для нейтронов разных энергий [18]

В методических указаниях 1990 г. [5] для характеристики поля излучения введена новая величина — полевая эквивалентная доза. Полевая эквивалентная доза H_p — эквивалентная доза в центре шара радиусом 1 г/см² из тканеэквивалентного вещества, совмещенном с точкой поля ионизирующего излучения, в которой определяется H_p .

Единицами $N_{\text{макс}}$, ПЭД, $H^*(10)$, H , являются единицы эквивалентной дозы.

Удобной характеристикой для расчета дозиметрических величин по известному флюенсу моноэнергетических частиц является приведенная дозиметрическая величина δ_G , представляющая собой дозиметрическую характеристику поля излучения G-го вида регистрируемого эффекта для единичного флюенса.

Расчету δ_G посвящено большое число работ [6, 7, 9, 10, 15, 17—30].

Для моноэнергетических источников фотонов с энергией E_0 , МэВ, базисные дозиметрические величины на единичный флюенс по поглощенной дозе δ_D , Гр·м², по керме δ_K , Гр·м², по эквивалентной дозе δ_H , Зв·м², по изымаемой из обращения экспозиционной дозе во внесистемных единицах δ_M Р·см², могут быть рассчитаны из следующих формул:

$$\delta_D(E_0) = 1,602 \cdot 10^{-13} E_0 \mu_{\text{en},m}^{\text{cp}}(E_0); \quad (1.36)$$

$$\delta_K(E_0) = 1,602 \cdot 10^{-13} E_0 \mu_{\text{tr},m}^{\text{cp}}(E_0); \quad (1.37)$$

$$\delta_H(E_0) = k \delta_D(E_0) = k \cdot 1,602 \cdot 10^{-13} E_0 \mu_{\text{en},m}^{\text{тк}}(E_0); \quad (1.38)$$

$$\delta_X(E_0) = 1,835 \cdot 10^{-8} E_0 \mu_{\text{en},m}^{\text{возд}}(E_0); \quad (1.39)$$

где $\mu_{\text{en},m}^{\text{cp}}(E_0)$, $\mu_{\text{tr},m}^{\text{cp}}(E_0)$ — массовый коэффициент поглощения энергии и передачи энергии соответственно в данной среде, в которой определяется δ_D или δ_K , м²/кг; $\mu_{\text{en},m}^{\text{тк}}(E_0)$ — массовый коэффициент поглощения энергии в биологической ткани, м²/кг; $\mu_{\text{en},m}^{\text{возд}}$ — массовый коэффициент поглощения энергии в воздухе, см²/г; k — коэффициент качества фотонного излучения, Зв/Гр.

Соотношения (1.36) и (1.39) записаны при условии соблюдения электронного равновесия.

Заметим, что $\delta_D = \delta_K(1-g)$. Для воздуха и ткани для $E_0 \lesssim 3$ МэВ $g \lesssim 0,01$, для $E_0 \lesssim 10$ МэВ $g \lesssim 0,04$ (рис. 1.4). Если можно пренебречь поправкой g (принять $g=0$), то $\delta_D = \delta_K$ для данной среды при наличии электронного равновесия.

Для моноэнергетических фотонов плоского мононаправленного источника с энергией E_0 , МэВ, фантомную максимальную эквивалентную дозу на единичный флюенс $\delta_{H,\text{макс}}$, Зв·м², можно аппроксимировать формулой по данным [31]:

$$\delta_{H,\text{макс}}(E_0) = 2,7778 \cdot 10^{-10} \exp[A + B(\ln E_0) + C(\ln E_0)^2 + F(\ln E_0)^3], \quad (1.40)$$

коэффициенты A , B , C , F для разного диапазона изменения E_0 приведены в табл. 1.12.

Рассчитанные значения δ_G базисных и фантомных дозиметрических величин приведены в табл. 1.13—1.15 и на рис. 1.8 и 1.9.

Обычно значения δ_G приводятся для нормального падения излучения на фантом.

Таблица 1.12

Коэффициенты A , B , C , F для формулы (1.40)

E_0 , МэВ	A	B	C	F
0,01—0,03	—20,477	—1,7454	—	—
0,03—0,5	—13,626	—0,57117	—1,0954	—0,24897
0,5—5	—13,133	0,72008	—0,033603	—
5—15	—12,791	0,28309	0,10873	—

Таблица 1.13

Дозиметрические величины на единичный флюенс для моноэнергетических фотонов: базисные величины для воздуха $\delta_D^{\text{возд}}$, Гр·м², $\delta_K^{\text{возд}}$, Гр·м² и для биологической ткани δ_H , Зв·м², $\delta_D^{\text{тк}}$, Гр·м², $\delta_K^{\text{тк}}$, Гр·м² и фантомные величины $\delta_{H,\text{макс}}$, Зв·м², $\delta_{\text{ПЭД}}$, Зв·м², $\delta_{H^*(10)}$, Зв·м². Коэффициент качества для фотонов для данных этой таблицы принят равным 1 Зв/Гр

E_0 , МэВ	Величины						
	Базисные			Фантомные			
	$\delta_D^{\text{возд}*1}$	$\delta_K^{\text{возд}*2}$	$\delta_H^{\text{тк}*3}$	$\delta_K^{\text{тк}*4}$	$\delta_{H,\text{макс}} [7]$	$\delta_{\text{ПЭД}} [7]$	$\delta_{H^*(10)} [19]$
0,03	7,209—17*		7,305—17		1,62—16	9,0—17	7,930—17
0,04	4,299—17		4,357—17		1,00—16**	6,5—17	6,191—17
0,05	3,236—17		3,324—17		8,06—17	5,3—17	5,274—17
0,06	2,893—17		3,028—17		7,35—17**	5,2—17	5,036—17
0,07	2,915—17		3,101—17		7,16—17**		5,072—17
0,08	3,063—17		3,306—17		7,24—17**	5,5—17	5,238—17
0,09	3,389—17		3,691—17		7,49—17**		5,659—17
0,10	3,717—17		4,069—17		7,86—17	6,4—17	6,095—17
0,15	5,983—17		6,632—17		1,05—16	9,8—17	8,920—17
0,2	8,555—17		9,516—17		1,39—16	1,31—16	1,189—16
0,3	1,379—16		1,533—16		2,11—16	1,98—16	1,807—16
0,4	1,890—16		2,102—16		2,74—16	2,5—16	2,363—16
0,5	2,379—16	2,387—16	2,643—16		3,25—16	3,1—16	2,902—16
0,6	2,836—16	2,845—16	3,153—16		3,78—16	3,6—16	3,375—16
0,7	3,286—16		3,651—16		4,22—16		3,877—16
0,8	3,691—16	3,717—16	4,101—16		4,67—16	4,6—16	4,282—16
0,9	4,094—16		4,548—16		5,01—16		4,709—16
1,0	4,470—16	4,502—16	4,966—16	4,998—16	5,50—16	5,6—16	5,139—16
1,5	6,104—16	6,152—16	6,800—16	6,848—16	7,30—16	7,4—16	6,959—16
2,0	7,497—16	7,561—16	8,330—16	8,394—16	8,92—16	9,2—16	8,472—16
3,0	9,900—16	9,996—16	1,096—15	1,105—15	1,17—15	1,20—15	1,109—15
4,0	1,198—15	1,218—15	1,320—15	1,339—15	1,39—15	1,42—15	1,330—15
5,0	1,394—15	1,426—15	1,538—15	1,570—15	1,61—15	1,62—15	1,533—15
6,0	1,586—15	1,624—15	1,730—15	1,778—15	1,82—15	1,83—15	1,745—15
7,0	1,772—15		1,934—15	—	2,03—15		1,932—15
8,0	1,948—15	2,012—15	2,127—15	2,188—15	2,24—15	2,2—15	2,123—15
9,0	2,134—15		2,321—15		2,44—15		2,326—15
10,0	2,307—15	2,403—15	2,499—15	2,579—15	2,64—15	2,6—15	2,538—15

*1 Расчеты выполнены по (1.36) при условии соблюдения электронного равновесия с использованием $\mu_{\text{en},m}$ из табл. 5.3.

*2 Расчет выполнен по (1.37) с использованием $\mu_{\text{tr},m} = \mu_{\text{en},m}/(1-g)$, где $\mu_{\text{en},m}$ принято из табл. 5.3, а g определено по данным работы [32]. Величина приведена в столбце только для $E_0 \geq 0,5$ МэВ, где она отлична от $\delta_D^{\text{возд}}$. При $E_0 < 0,5$ МэВ $\delta_K^{\text{возд}} = \delta_D^{\text{возд}}$.

*3 $\delta_H = k \delta_D^{\text{тк}}$. В настоящей таблице коэффициент качества принят равным $k=1$ Зв/Гр. Поэтому δ_H , Зв·м², и $\delta_K^{\text{тк}}$, Гр·м², численно совпадают.

*4 Расчет выполнен по формуле (1.37) с использованием $\mu_{\text{tr},m} = \mu_{\text{en},m}/(1-g)$, где $\mu_{\text{en},m}$ принято из табл. 5.3, а g определено по данным [32]. Величина приведена в столбце только для $E_0 \geq 1,0$ МэВ, где она отлична от $\delta_D^{\text{тк}}$. При $E_0 < 1,0$ МэВ $\delta_K^{\text{тк}} = \delta_D^{\text{тк}}$.

*5 Читать как $7,209 \cdot 10^{-17}$.

*6 Рассчитано по (1.40).

Таблица 1.14

Дозиметрические величины на единичный флюенс для моноэнергетических нейтронов и тканезвивалентного фантома: δ_K , Гр·м², $\delta_{D, \max}$, Гр·м², $\delta_{H, \max}$, Зв·м², $\delta_{\text{ПЭД}}$, Зв·м², $\delta_{H^*(10)}$, Зв·м², и коэффициенты качества излучения k

E_0 , МэВ	δ_K [6]	$\delta_{D, \max}$ [7,20]	$\delta_{H, \max}$ [7,20]	$\delta_{\text{ПЭД}}$ [7]	$\delta_{H^*(10)}$ [18]	k [7,20]
2,5—8* ¹	2,72—17	5—16	1,07—15	9,5—16	8,00—16	2,3
1,0—7	1,36—17	6—16	1,16—15		1,04—15	2
1,0—6	4,30—18	6—16	1,26—15	1,18—15	1,12—15	2
1,0—5	1,46—18	6—16	1,21—15	1,16—15	9,20—16	2
1,0—4	1,43—18	6—16	1,16—15	1,10—15	7,10—16	2
1,0—3	1,01—17	5—16	1,03—15	9,5—16	6,20—16	
5,0—3	1,87—17					
1,0—2	9,44—17	5—16	9,9—16	9,5—16	8,60—16	2
2,0—2					1,46—15	
5,0—2	3,87—16				3,50—15	
1,0—1	6,40—16	8—16	5,8—15	9,6—15	6,90—15	7,4
2,0—1	9,81—16				1,26—14	
5,0—1	1,58—15	1,8—15	2,0—14	2,4—14	2,58—14	11
1,0	2,44—15	3,1—15	3,3—14	3,8—14	3,40—14	10,6
2,0	2,98—15	4,3—15	4,0—14		3,52—14	9,3
2,5	3,26—15			3,4—14		
3,0	3,61—15				3,80—14	
5,0	1,39—15	5,3—15	4,1—14	3,9—14	3,78—14	7,8
10	5,54—15	6,0—15	4,1—14	4,1—14	4,46—14	6,8
20	6,96—15	7,2—15	4,3—14	6,5—14	6,50—14	6,0

*¹ Читать как $2,5 \cdot 10^{-8}$.*² Значение для $E_0 = 18$ МэВ.

Таблица 1.15

Максимальная эквивалентная доза на единичный флюенс $\delta_{H, \max}$, Зв·м², для электронов, β -излучения и протонов [10]

Электроны		β -Излучение* ¹		Протоны	
E_0 , МэВ	$\delta_{H, \max}$	E_0 , МэВ* ²	$\delta_{H, \max}$	E_0 , МэВ	$\delta_{H, \max}$
0,1	1,7—13	0,2	3,1—13	2	1,7—10
0,2	8,7—14	0,3	2,1—13	5	1,0—10
0,3	6,3—14	0,4	1,5—13	10	6,0—11
0,5	4,6—14	0,5	1,3—13	20	4,5—11
0,8	3,9—14	0,7	8,6—14	50	8,9—12
1,0	3,7—14	1,0	6,3—14	100	2,4—12
2,0	3,3—14	1,5	4,7—14	200	3,0—13
3—10	3,2—14	2,0	4,2—14	500	1,2—13
20	3,4—14	2,5	4,0—14	1000	1,5—13
50	3,8—14	3,0	3,9—14	3000	2,5—13
100	4,2—14	3,5	3,8—14	10 000	3,6—13

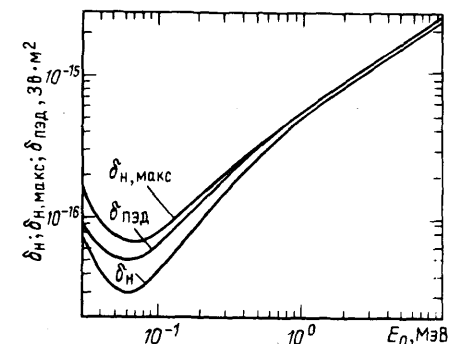
*¹ Для кожи как критического органа.*² Максимальная энергия β -излучения.

Рис. 1.8. Зависимость от энергии фотонного излучения базисной эквивалентной дозы на единичный флюенс $\delta_{H, \max}$ максимальной эквивалентной дозы (фантомной) на единичный флюенс $\delta_{H, \max}$ [7], показателя эквивалентной дозы (фантомного) на единичный флюенс $\delta_{\text{ПЭД}}$ [7]. Зависимости построены по данным табл. 1.13

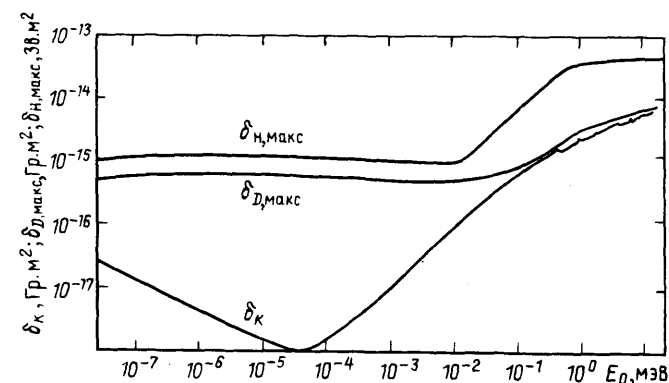


Рис. 1.9. Зависимость от энергии нейтронов максимальной эквивалентной дозы (фантомной) на единичный флюенс $\delta_{H, \max}$ [7, 20], максимальной поглощенной тканевой дозы (фантомной) на единичный флюенс $\delta_{D, \max}$ [7, 20] и тканевой кермы на единичный флюенс δ_K [6]. Зависимости построены по данным табл. 1.14

В [30] показано, что для различных угловых распределений фотонов источника с энергией $E_0 \leq 1,5$ МэВ разница в значениях доз в диапазоне глубин 0—20 см ткани составляет от нескольких процентов до нескольких раз в зависимости от энергии излучения источника E_0 .

Анализ данных работ, посвященных расчету δ_G для нейтронов, показывает большой разброс δ_G по данным разных авторов (рис. 1.10). На это обстоятельство обращено внимание также в работе [33].

Разные органы или ткани имеют разные чувствительности. Известно, например, что при одинаковой эквивалентной дозе облучения возникновение рака в легких более вероятно, чем в щитовидной железе, а облучение гонад (половых желез) особенно опасно из-за риска генетических повреждений. Поэтому для случаев неравномерного облучения разных органов или тканей тела человека введено понятие эффективной эквивалентной дозы H_E .

Для определения этой величины необходимо ввести понятие риска. Риск — вероятность возникновения неблагоприятных последствий для человека (частота смертельных случаев, снижение продолжительности

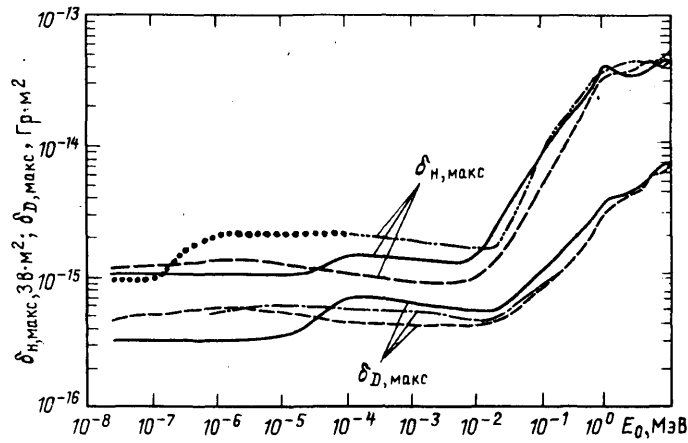


Рис. 1.10. Зависимость от энергии нейтронов максимальной эквивалентной дозы (фантомной) на единичный флюенс $\delta_{H, \max}$ и максимальной поглощенной тканевой дозы на единичный флюенс $\delta_{D, \max}$ по данным разных авторов для нейтронов, падающих перпендикулярно на гомогенные тканезквивалентные фантомы в виде бесконечной пластины толщиной 30 см (—) [22], правильного кругового цилиндра диаметром 30 и высотой 60 см (---) [23], правильного бесконечного кругового цилиндра диаметром 30 см (— · —) [24], бесконечного эллиптического цилиндра с большой и малой полуосями 12 и 18 см (— · · —) [21], (· · · · и — · — ·) [10]

жизни, частота возникновения профессиональных заболеваний, травматизма, нетрудоспособности и т. д.) вследствие облучения, аварии или другой причины, проявление которых носит стохастический характер.

Эффективная эквивалентная доза

$$H_E = \sum_T w_T H_T, \quad (1.41)$$

где H_T — эквивалентная доза в T -м органе или ткани; w_T — взвешивающий фактор, представляющий собой отношение стохастического риска смерти в результате облучения T -го органа или ткани к риску смерти от равномерного облучения тела при одинаковых эквивалентных дозах (рис. 1.11), величина $w_T = 0,30$, отведенная на все другие органы, распределяется поровну между пятью оставшимися органами и тканями, не указанными на рис. 1.11, которые получили самую высокую эквивалентную дозу. Таким образом, w_T определяет весовой вклад данного органа или ткани в риск неблагоприятных последствий для организма при равномерном облучении:

$$\sum_T w_T = 1. \quad (1.42)$$

При равномерном облучении всего организма эквивалентная доза в каждом органе или ткани одна и та же: $H_T = H$, и, следовательно, $H_E = H$.

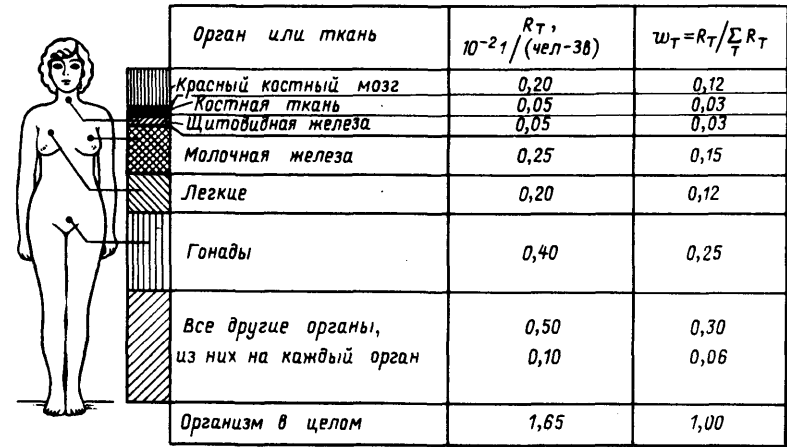


Рис. 1.11. Взвешивающие факторы w_T и риск смерти R_T от злокачественных опухолей и наследственных дефектов (у первых двух поколений облученных лиц) в результате облучения на 1 человека при эквивалентной дозе 1 Зв для задач радиационной защиты

Таким образом, эффективная эквивалентная доза при неравномерном по органам и тканям облучении равна такой эквивалентной дозе при равномерном облучении всего организма, при которой риск неблагоприятных последствий будет таким же, как и при данном неравномерном облучении.

Единицы эффективной эквивалентной дозы совпадают с единицами эквивалентной дозы.

Эквивалентная доза или эффективная эквивалентная доза характеризуют меру ожидаемого эффекта облучения для одного индивидуума. Эти величины являются *индивидуальными дозами*. На практике возникает также необходимость оценивать меру ожидаемого эффекта при облучении больших групп людей, вплоть до целых популяций.

Для оценки стохастических ожидаемых эффектов облучения персонала или населения часто используется *коллективная эффективная эквивалентная доза*, которая определяется выражением

$$S_E = \int_0^{\infty} N(H_E) H_E dH_E = N_0 \int_0^{\infty} f(H_E) H_E dH_E, \quad (1.43)$$

где $N(H_E) dH_E$ — количество лиц, получающих эффективную эквивалентную дозу в пределах от H_E до $H_E + dH_E$; $f(H_E)$ — статистическая плотность распределения эффективной эквивалентной дозы среди облучаемых лиц; N_0 — полное число облучаемых лиц. Вместо H_E в формуле (1.43) можно использовать эквивалентную дозу H . Тогда мы получим *коллективную эквивалентную дозу* S .

Единица коллективной эффективной эквивалентной дозы в СИ — *человеко-зиверт* (чел·Зв), внесистемная единица — *человеко-бэр* (чел·бэр).

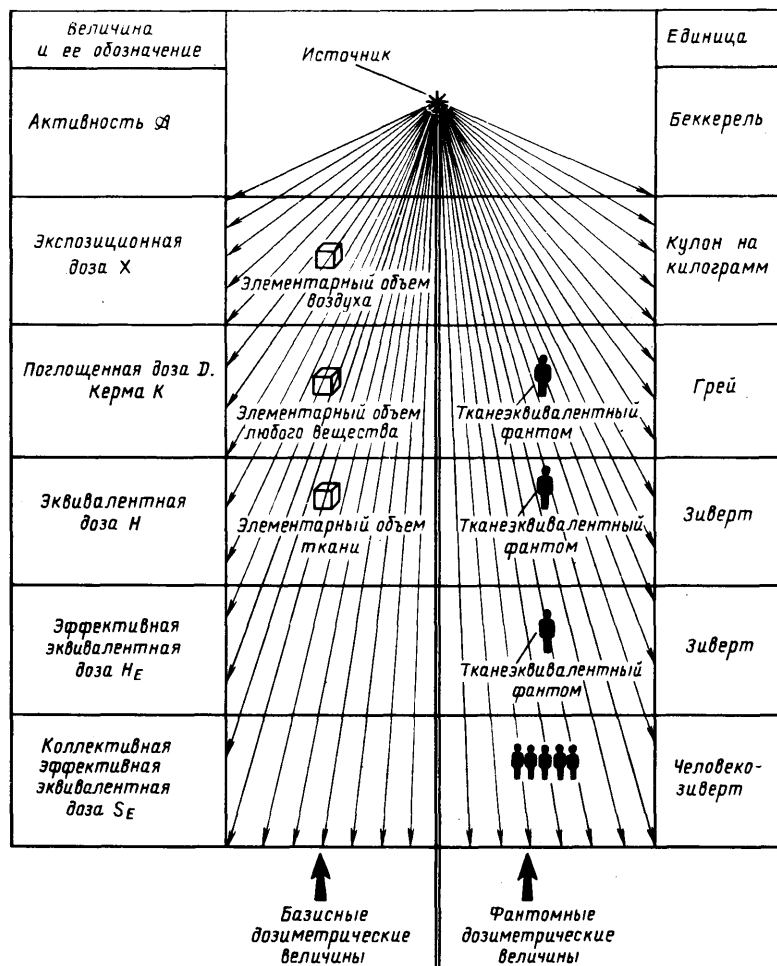


Рис. 1.12. Базисные и фантомные дозиметрические величины

Мощность поглощенной дозы \dot{D} (мощность кермы \dot{K} , мощность экспозиционной дозы \dot{X} , мощность эквивалентной дозы \dot{H} , мощность эффективной эквивалентной дозы \dot{H}_E , мощность коллективной эффективной эквивалентной дозы \dot{S}_E и т. д.) — отношение приращения поглощенной дозы dD (кермы dK , экспозиционной дозы dX , эквивалентной дозы dH , эффективной эквивалентной дозы dH_E , коллективной эффективной эквивалентной дозы dS_E и т. д.) за интервал времени dt к этому интервалу:

$$\dot{D} = dD/dt (\dot{K} = dK/dt, \dot{X} = dX/dt, \dot{H} = dH/dt, \dot{H}_E = dH_E/dt, \dot{S}_E = dS_E/dt). \quad (1.44)$$

Величины \dot{D} , \dot{K} , \dot{X} , \dot{H} , \dot{H}_E , \dot{S}_E могут быть как постоянными, так и изменяться во времени по некоторому закону. Их единицы — частные от деления единиц поглощенной дозы (кермы, экспозиционной дозы, характеристик эквивалентной дозы) или их кратных или дольных единиц на соответствующую единицу времени.

Смысл всех рассмотренных выше величин в наглядной форме показан на рис. 1.12.

Из этого рисунка видно, что экспозиционная доза является характерной базисной величиной. Поглощенная доза, керма, эквивалентная доза могут быть также базисными, если они определены в невозмущенном исходном поле. Эти базисные величины относятся к элементарному объему вещества, помещенного в точку определения дозиметрической величины, не искажающему исходное поле. Если они определены для тканезквивалентного фантома — они становятся фантомными. Заметим еще раз, что эквивалентную дозу в тканезквивалентных фантомах можно определять по максимальной эквивалентной дозе H_{\max} , по показателю эквивалентной дозы ПЭД или по амбиентной эквивалентной дозе $H^*(10)$.

Глава 2

ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ИСТОЧНИКОВ ИЗЛУЧЕНИЯ И ЗАЩИТ

§ 2.1. КЛАССИФИКАЦИЯ ИСТОЧНИКОВ ИЗЛУЧЕНИЯ

Для однозначного задания источника излучения должны быть указаны следующие характеристики.

1. Вид излучения: нейтроны, фотоны, протоны, β -частицы, электроны, α -частицы и т. д.

2. Геометрия источника, источники: а) точечные; б) протяженные (линейные, поверхностные, объемные) с ограниченными, полубесконечными или бесконечными размерами.

Точечным можно считать такой источник, максимальные размеры которого много меньше расстояния до точки детектирования и длины свободного пробега в материале источника (ослаблением излучения в источнике можно пренебречь).

Поперечные размеры линейных источников должны быть намного меньше расстояния до детектора и длины свободного пробега частиц в материале источника.

Поверхностные источники имеют толщину, намного меньшую, чем расстояние до точки детектирования и длина свободного пробега в материале источника.

В объемном источнике излучатели распределены в трехмерной области пространства.

3. *Мощность и ее распределение для протяженных источников:* равномерное, экспоненциальное, линейное, по косинусоидальному закону и т. д.

4. *Энергетический спектр излучения:* моноэнергетический, немонаэнергетический (дискретный или непрерывный спектр).

5. *Временное распределение излучения:* импульсные, стабильные и нестабильные источники.

6. *Угловое распределение излучения.* Для моноэнергетических осесимметричных источников, наиболее часто встречающихся на практике, угловое распределение излучения задается зависимостью от угла θ_0 между направлением движения частиц из источника и осью симметрии в виде

$$S(\theta_0) = S_0 f(\theta_0), \quad (2.1)$$

где $S(\theta_0)$ — число частиц, испускаемых в единицу времени в единичный телесный угол в направлении θ_0 точечным источником или линейным (поверхностным, объемным) равномерным источником с единицы длины (поверхности, объема); ниже в формулах функция $f(\theta_0)$ нормирована так, что S_0 — число частиц, испускаемых в единицу времени в полупространство в телесный угол 2π ср в направлении защиты точечным источником или равномерным линейным (поверхностным, объемным) источником с единицы длины (поверхности, объема).

Наиболее часто рассматривают следующие распределения:

изотропное

$$S(\theta_0) = S_0 f(\theta_0) = S_0 / (2\pi); \quad (2.2)$$

косинусоидальное, пропорциональное $\cos\theta_0$,

$$S(\theta_0) = S_0 f(\theta_0) = S_0 \cos\theta_0 / \pi; \quad (2.3)$$

косинусоидальное, пропорциональное $\cos^n\theta_0$,

$$S(\theta_0) = S_0 f(\theta_0) = (n+1) S_0 \cos^n\theta_0 / (2\pi); \quad (2.4)$$

мононаправленное

$$S(\theta_0) = S_0 f(\theta_0) = S_0 \delta(\cos\theta_0 - 1) / (2\pi); \quad (2.5)$$

комбинацию изотропных и косинусоидальных угловых распределений излучения

$$S(\theta_0) = S_0 f(\theta_0) = (S_0 / (2\pi)) [B + 2C \cos\theta_0]. \quad (2.6)$$

В формуле (2.5) δ — дельта-функция, в формуле (2.6) $B + C = 1$. Если функцию $f(\theta_0)$ нормировать так, чтобы излучение испускалось в телесный угол 4π ср, то значения $f(\theta_0)$ будут в два раза меньше, чем приведенные в формулах (2.2) — (2.6).

Наиболее общим является распределение (2.4), при $n=0$ оно перейдет в (2.2), при $n=1$ — в (2.3), при $n \rightarrow \infty$ — в (2.5).

Таким образом, наиболее подробные характеристики излучения стационарного по времени точечного (линейного, поверхностного или объемного) источника описываются функцией $S(r_0, E_0, \Omega_0)$, которая представляет собой отношение числа частиц с энергией от E_0 до $E_0 + dE_0$, испущенных за время dt в направлении Ω_0 в пределах элементарного телесного угла $d\Omega_0$ из точки пространства r_0 (с элементарной длины dl , поверхности dS или объема dV источника, расположенного в этой точке), к интервалу времени dt , энергетическому интервалу dE_0 , элементарному телесному углу $d\Omega_0$ (для протяженных источников также к его элементарной длине dl , поверхности dS или объему dV).

Излучение точечного моноэнергетического источника с энергией частиц E_0 , помещенного в точке r_0 , описывается выражением

$$S(r; \theta_0, E) = f(\theta_0) \delta(r - r_0) \delta(E - E_0). \quad (2.7)$$

Излучение плоского моноэнергетического равномерного источника с энергией частиц E_0 , плоскость которого перпендикулярна некоторому единичному вектору k и проходит через точку r_0 , а угловое распределение излучения симметрично относительно k , описывается выражением

$$S(r, \theta_0, E) = f(\theta_0) \delta(rk - r_0k) \delta(E - E_0). \quad (2.8)$$

В формулах (2.7) и (2.8) $f(\theta_0) = \delta(\cos\theta_0 - 1) / (2\pi)$ для мононаправленного, $f(\theta_0) = 1 / (2\pi)$ для изотропного, $f(\theta_0) = \cos\theta_0 / \pi$ для косинусоидального при $f(\theta_0) \sim \cos\theta_0$, $f(\theta_0) = (n+1) \cos^n\theta_0 / (2\pi)$ для косинусоидального при $f(\theta_0) \sim \cos^n\theta_0$ источников. Величины $S(r, \theta_0, E)$ нормированы на 1 частицу, испускаемую в единицу времени из точечного источника или с единичной поверхности плоского источника соответственно в телесный угол 2π ср в направлении защиты.

Таким образом, для правильного задания источника необходимо указать все его характеристики, например некоторый линейный источник может быть задан так: линейный длиной l , равномерный изотропный стабильный моноэнергетический источник фотонного излучения с энергией E_0 , с выходом частиц с единицы длины S_L .

§ 2.2. РАДИОАКТИВНЫЕ НУКЛИДЫ КАК γ -ИЗЛУЧАТЕЛИ

КВАНТОВОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ РАДИОНУКЛИДОВ БЕЗ НАЧАЛЬНОЙ ФИЛЬТРАЦИИ

Характеристики поля γ -излучения точечных изотропных радионуклидных источников, рассчитанные для стандартных условий (активности радионуклида $A = 1$ Бк и расстояния от источника до детектора $r = 1$ м), называют *гамма-постоянными*. Гамма-постоянные, рассчитанные для разных дозиметрических величин G (функций отклика детекторов) [5, 6, 9, 34, 35], нашли широкое применение при решении задач радиационной физики, дозиметрии и защиты от излучений.

Различают *полные и дифференциальные гамма-постоянные*. Гамма-постоянная, рассчитанная для определенной i -й энергии фотонов E_{0i} радионуклида для дозиметрической величины G , называется дифференциальной и обозначается Γ_{Gi} . Полная гамма-постоянная Γ_G равна сумме всех дифференциальных $\Gamma_{Gi} = \sum \Gamma_{Gi}$.

* Здесь r_0, r, Ω_0, k — векторные величины.

Таблица 2.1

Зависимость нормализованных гамма-постоянных от энергии фотонов

E_0 , МэВ	Γ_{Ki}^{*1} аГр·м ² /(с·Бк)	Γ_{Hi}^* азВ·м ² /(с·Бк)	$\Gamma_{H, \max, i}^{*2}$ азВ·м ² /(с·Бк)
0,03	5,74	5,81	12,9
0,04	3,42	3,47	7,96
0,05	2,58	2,64	6,41
0,06	2,30	2,41	5,85
0,07	2,32	2,47	5,70
0,08	2,44	2,63	5,76
0,09	2,70	2,94	5,96
0,10	2,96	3,24	6,25
0,15	4,76	5,28	8,36
0,2	6,81	7,57	11,1
0,3	11,0	12,2	16,8
0,4	15,0	16,7	21,8
0,5	18,9	21,0	26,9
0,6	22,6	25,1	30,1
0,7	26,2	29,1	33,6
0,8	29,4	32,6	37,2
0,9	32,6	36,2	39,9
1,0	35,6	39,5	43,8
1,5	48,6	54,1	58,1
2,0	59,7	66,3	71,0
3,0	78,8	87,2	93,1
4,0	95,3	105	111
5,0	111	122	128
6,0	126	138	145
7,0	141	154	162
8,0	155	169	178
9,0	170	185	194
10,0	184	199	210

Гамма-постоянная радионуклида по мощности дозиметрической величины \dot{G} является отношением мощности дозиметрической величины \dot{G} , создаваемой фотонами расположенного в вакууме* точечного изотропно излучающего источника данного радионуклида на расстоянии r от источника, умноженной на квадрат этого расстояния, к активности A источника:

$$\Gamma_G = \dot{G}r^2/A. \quad (2.9)$$

По физическому смыслу Γ_G — мощность дозиметрической величины \dot{G} для источника активностью 1 Бк на расстоянии 1 м в вакууме.

Обратим внимание, что нижний индекс при гамма-постоянных показывает символ дозиметрической величины \dot{G} , для которой рассчитана гамма-постоянная.

В последние годы широкое использование нашла гамма-постоянная по мощности воздушной кермы Γ_K , которая в соответствии с определением гамма-постоянной является отношением мощности воздушной кермы K , создаваемой фотонами расположенного в вакууме точечного изотропно излучающего источника данного радионуклида на расстоянии r от источника, умноженной на квадрат этого расстояния, к активности A источника:

$$\Gamma_K = \dot{K}r^2/A. \quad (2.10)$$

Эту величину принято называть керма-постоянной [5]. Единица керма-постоянной — *грей-метр в квадрате на секунду-беккерель* [Γ_K : м²/(с·Бк)]. Рекомендуемая предпочтительная единица — аГр × м²/(с·Бк).

Пусть имеется точечный изотропный радионуклид, энергетический спектр γ -излучения которого содержит m групп фотонов разной энергии, для i -й группы ($i=1, 2, \dots, m$) энергия фотонов равна E_{0i} , МэВ, квантовый выход (число фотонов с энергией E_{0i} на один распад ядра) n_i , фотон/распад.

Полную керма-постоянную для такого источника Γ_K , аГр·м²/(с·Бк), рассчитывают по формуле [9]

$$\Gamma_K = \frac{A \sum_{i=1}^m [E_{0i} n_i \mu_{tr, m, i}^{\text{возд}}] \cdot 1,602 \cdot 10^{-13} r^2 \cdot 10^{18}}{4\pi r^2 \omega A} = 12750 \sum_{i=1}^m [E_{0i} n_i \mu_{tr, m, i}^{\text{возд}}] = \sum_{i=1}^m \Gamma_{Ki} n_i = \sum_{i=1}^m \Gamma_{Ki}, \quad (2.11)$$

где $\mu_{tr, m, i}^{\text{возд}}$ — массовый коэффициент передачи энергии фотонов i -й энергии в воздухе, м²/кг; $1,602 \cdot 10^{-13}$ — коэффициент перевода 1 МэВ в джоули; $\omega=1$ Дж/(кг·Гр); Γ_{Ki} — нормализованная дифференциальная керма-постоянная, рассчитанная для выхода 1 фотона на 1 распад, т. е. для $n_i=1$ (табл. 2.1); Γ_{Ki} — дифференциальная керма-постоянная; 10^{18} — коэффициент пересчета 1 Гр в аттогрей.

Аналогично можно записать формулы для расчетов гамма-постоянных для других дозиметрических величин. Например, гамма-постоянную

* Пояснение, что источник расположен в вакууме, обращает внимание на то, что поглощение и рассеяние в воздухе, имеющемся в реальных задачах и окружающем источник и детектор, не учитывается.

1 Расчеты выполнены с учетом для воздуха $\mu_{tr, m} = \mu_{en, m}$. При этом $\Gamma_{Ki}^ = \Gamma_{Di}^*$.
2 Расчет выполнен по формуле $\Gamma_{H, \max, i}^(E_0) = \delta_{H, \max, i}(E_0) 10^{18} / (4\pi)$, принимаемая $\delta_{H, \max}$ из табл. 1.13 для плоского мононаправленного источника, могут использоваться при выполнении условий формирования данной дозиметрической характеристики.

по мощности эквивалентной дозы Γ_H , азВ·м²/(с·Бк), можно рассчитать по формуле

$$\Gamma_H = \frac{A \sum_{i=1}^m [E_{0i} n_i \mu_{en, m, i}^{\text{тк}} k_i] \cdot 1,602 \cdot 10^{-13} r^2 \cdot 10^{18}}{4\pi r^2 \omega A} = 12750 \sum_{i=1}^m [E_{0i} n_i \mu_{en, m, i}^{\text{тк}} k_i] = \sum_{i=1}^m \Gamma_{Hi} n_i = \sum_{i=1}^m \Gamma_{Hi}, \quad (2.12)$$

где $\mu_{en,m,i}^{TK}$ — массовый коэффициент поглощения энергии фотонов i -й энергии в биологической ткани, m^2/kg ; k_i — коэффициент качества фотонов с энергией E_{0i} , Зв/Гр; остальные обозначения подобны введенным выше. Значения Γ_{Hi}^* приведены в табл. 2.1. В настоящей работе при расчете Γ_{Hi}^* коэффициент качества для фотонов принят равным 1 Зв/Гр.

Поделив левые и правые части формулы (2.12) и (2.11) для одного и того же моноэнергетического источника и учитывая, что $\mu_{en,m} = \mu_{tr,m}$ (1-g), можно записать

$$\frac{\Gamma_H}{\Gamma_K} = \frac{\mu_{en,m}^{TK}}{\mu_{tr,m}^{возд}} k = \frac{\mu_{en,m}^{TK}}{\mu_{en,m}^{возд}} (1-g)k. \quad (2.13)$$

Таким образом,

$$\Gamma_H = \frac{\mu_{en,m}^{TK}}{\mu_{en,m}^{возд}} (1-g)k\Gamma_K, \quad (2.14)$$

где g — доля энергии вторичных заряженных частиц, переходящих в воздухе в тормозное излучение (рис. 1.4).

Если принять $k=1$ Зв/Гр и учесть [9], что $\mu_{en,m}^{TK}/\mu_{en,m}^{возд} = 1,09 \pm 0,03$ для фотонов в диапазоне энергий 0,04—15 МэВ, а $g \approx 0,01$ для энергий фотонов радионуклидных источников (рис. 1.4), то в этих приближениях можно записать:

$$\Gamma_H \approx 1,09k\Gamma_K. \quad (2.15)$$

Нетрудно показать, что гамма-постоянная по мощности поглощенной дозы в воздухе

$$\Gamma_D = \Gamma_K(1-g). \quad (2.16)$$

Учитывая, что $g \approx 0,01$, с хорошей точностью можно записать:

$$\Gamma_D \approx \Gamma_K. \quad (2.17)$$

Знак « \approx » в формулах (2.15) и (2.17) означает, что равенство справедливо, если $g=0$.

Ранее до перехода на единицы СИ на практике широко использовалась *гамма-постоянная по мощности экспозиционной дозы* во внесистемных единицах Γ_X . Она рассчитывалась для стандартных условий: активности $A_0=1$ мКи, расстояния от источника до детектора $r_0=1$ см. Гамма-постоянную Γ_X определяли как отношение мощности экспозиционной дозы \dot{X} , создаваемой фотонами расположенного в вакууме точечного изотропно излучающего источника данного радионуклида на расстоянии r_0 от источника, умноженной на квадрат этого расстояния, к активности источника A_0 :

$$\Gamma_X = \dot{X}r_0^2/A_0. \quad (2.18)$$

Внесистемная единица Γ_X — *рентген-сантиметр в квадрате на час-милликюри* [$R \cdot cm^2/(ч \cdot мКи)$].

По причинам, изложенным в § 1.5, в переходный период было рекомендовано отказаться от использования экспозиционной дозы и производных от нее величин, в том числе и от Γ_X . Однако, учитывая, что специалисты еще долгие годы в опубликованной научной литературе будут встречаться с этой величиной, рассмотрим ее более подробно.

Для точечного изотропного радионуклида активностью A_0 , мКи, полную гамма-постоянную по экспозиционной дозе во внесистемных единицах Γ_X , $R \cdot cm^2/(ч \cdot мКи)$, можно рассчитать по формуле

$$\Gamma_X = \frac{A_0 3,7 \cdot 10^7 \sum_{i=1}^m [E_{0i} n_i \mu_{en,m,i}^{возд}] 1,602 \cdot 10^{-6} \cdot 3600 r_0^2}{4\pi r_0^2 \cdot 87,3 \cdot A_0} = 194,5 \sum_{i=1}^m [E_{0i} n_i \mu_{en,m,i}^{возд}] = \sum_{i=1}^m \Gamma_{Xi}^* n_i = \sum_{i=1}^m \Gamma_{Xi}, \quad (2.19)$$

где $3,7 \cdot 10^7$ — число распадов в секунду, соответствующее активности 1 мКи; $\mu_{en,m,i}^{возд}$ — массовый коэффициент поглощения энергии в воздухе, cm^2/g ; $1,602 \cdot 10^{-6}$ — коэффициент перевода 1 МэВ в эрги; 3600 — число секунд в 1 ч; 87,3 — энергетический эквивалент 1 Р, эрг/(г·Р); Γ_{Xi}^* — нормализованная дифференциальная гамма-постоянная по мощности экспозиционной дозы, рассчитанная для выхода 1 фотона на 1 распад, т. е. для $n_i=1$; Γ_{Xi} — дифференциальная гамма-постоянная по мощности экспозиционной дозы.

Из формул (2.11) и (2.19) легко определить связь между гамма-постоянной по воздушной керме (керма-постоянной) Γ_K , $aGr \cdot m^2/(с \cdot Бк)$ и гамма-постоянной по экспозиционной дозе во внесистемных единицах Γ_X , $R \cdot cm^2/(ч \cdot мКи)$, и показать, что

$$\Gamma_K = 6,55\Gamma_X; \quad (2.20)$$

$$\Gamma_X = 0,152\Gamma_K. \quad (2.21)$$

При этом следует помнить, что знак равенства в формулах (2.20) и (2.21) поставлен чисто условно, так как Γ_K и Γ_X — разные физические величины, определенные в разных системах единиц.

Нетрудно показать, что нормализованная дифференциальная гамма-постоянная Γ_{Gi}^* связана с величиной $\delta_G(E_{0i})$ [см. формулы (1.36) — (1.40), табл. 1.13] соотношением

$$\Gamma_{Gi}^* = \frac{c\delta_G(E_{0i})}{4\pi}, \quad (2.22)$$

где c — постоянная, учитывающая единицы величин Γ_{Gi}^* и $\delta_G(E_{0i})$. Так, если для мощности эквивалентной дозы Γ_{Gi}^* выражены в $aЗв \cdot m^2/(с \cdot Бк)$, а $\delta_G(E_{0i})$ в $Зв \cdot m^2$, то, очевидно, что $c=10^{16}$.

Из определения гамма-постоянных [формула (2.9)] легко найти мощность данной дозиметрической величины \dot{G} на расстоянии r от точечного изотропного радионуклида активностью A с гамма-постоянной Γ_G по формуле

$$\dot{G} = A\Gamma_G/r^2. \quad (2.23)$$

В приведенных выше формулах (2.11), (2.12), (2.19) и в большинстве работ [9, 34, 35] рассматриваются гамма-постоянные для базисных дозиметрических величин. Однако можно определить гамма-постоянные и для фантомных величин [31]. Например, приводимые ниже в табл. 2.2 гамма-постоянные по мощности максимальной эквивалентной дозы $\Gamma_{H,макс}$ были рассчитаны с использованием формулы (2.22) из соотношения

$$\Gamma_{H, \text{макс}} = \sum_{i=1}^m \Gamma_{H, \text{макс}, i} = \sum_{i=1}^m \Gamma_{H, \text{макс}, i}^* n_i = c \sum_{i=1}^m \frac{\delta_{H, \text{макс}}(E_{0i}) n_i}{4\pi}. \quad (2.24)$$

Исходными для расчета гамма-постоянных являются данные об энергетическом спектре нуклида (значения E_{0i} , n_i для фотонов всех энергий), задаваемые обычно в виде схем распада.

При расчетах гамма-постоянной учитывается КХ- и аннигиляционное излучение (два фотона с энергией 0,511 МэВ на один позитрон); не учитывается вклад в дозовые характеристики от тормозного излучения и корпускулярных частиц.

Для радионуклидов, распадающихся в дочерний нестабильный нуклид, в гамма-постоянной необходимо учесть γ -излучение всех образующихся нестабильных дочерних продуктов.

Гамма-постоянная по мощности дозиметрической величины \hat{G} , отнесенная к единичной активности материнского радионуклида, с учетом γ -излучения всех дочерних нуклидов определяется по формуле

$$\Gamma_G = \Gamma_{G_1} + \sum_{j=2}^n \Gamma_{G_j} \xi_j, \quad (2.25)$$

где Γ_{G_1} — гамма-постоянная материнского нуклида; Γ_{G_j} — гамма-постоянная $(j-1)$ -го дочернего нуклида; $(n-1)$ — число дочерних нуклидов в цепочке распада; нижние индексы при гамма-постоянных и значениях ξ указывают на место радионуклида в цепочке распада, начиная с материнского нуклида, ξ_j — поправочный коэффициент для $(j-1)$ -го дочернего радионуклида.

Поправочный коэффициент ξ_j характеризует отношение активности $(j-1)$ -го дочернего продукта к материнскому:

$$\xi_j = \frac{\lambda_j N_j}{\lambda_1 N_1}, \quad (2.26)$$

где λ_1 , λ_j — постоянные радиоактивного распада материнского и $(j-1)$ -го дочернего продуктов соответственно; N_1 и N_j — числа радиоактивных атомов материнского и $(j-1)$ -го дочернего продуктов соответственно.

Если в начальный момент $t=0$ имелся только материнский радионуклид, характеризуемый числом радиоактивных атомов N_{10} , то для неветвящейся цепочки радиоактивного распада из n последовательно распадающихся нуклидов с постоянными распада $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_j, \dots, \lambda_n$ изменение числа радиоактивных атомов в зависимости от времени может быть рассчитано по формулам

$$N_1 = N_{10} e^{-\lambda_1 t};$$

$$N_2 = \frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} (e^{-\lambda_1 t} - e^{-\lambda_2 t}) N_{10};$$

$$N_3 = \lambda_1 \lambda_2 \left[\frac{e^{-\lambda_1 t}}{(\lambda_2 - \lambda_1)(\lambda_3 - \lambda_1)} + \frac{e^{-\lambda_2 t}}{(\lambda_1 - \lambda_2)(\lambda_3 - \lambda_2)} + \frac{e^{-\lambda_3 t}}{(\lambda_1 - \lambda_3)(\lambda_2 - \lambda_3)} \right] N_{10}; \quad (2.27)$$

$$N_n = \lambda_1 \lambda_2 \dots \lambda_{n-1} \left[\frac{e^{-\lambda_1 t}}{(\lambda_2 - \lambda_1)(\lambda_3 - \lambda_1) \dots (\lambda_n - \lambda_1)} + \dots \right. \\ \left. \dots + \frac{e^{-\lambda_n t}}{(\lambda_1 - \lambda_n)(\lambda_2 - \lambda_n) \dots (\lambda_{n-1} - \lambda_n)} \right] N_{10}. \quad (2.27)$$

Отсюда легко определить значения ξ_i :

$$\xi_i = \lambda_2 \lambda_3 \dots \lambda_i \left[\frac{1}{(\lambda_2 - \lambda_1)(\lambda_3 - \lambda_1) \dots (\lambda_i - \lambda_1)} + \dots + \frac{e^{-(\lambda_i - \lambda_1)t}}{(\lambda_1 - \lambda_i)(\lambda_2 - \lambda_i) \dots (\lambda_{i-1} - \lambda_i)} \right]. \quad (2.28)$$

Например, для $i=2$

$$\xi_2 = \frac{\lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1} [1 - e^{-(\lambda_2 - \lambda_1)t}]. \quad (2.29)$$

Если в начальный момент радиоактивный источник кроме материнских атомов N_{10} содержит атомы какого-то $(j-1)$ -го дочернего вещества, т. е. $N_{j0} \neq 0$, то число атомов n -го радионуклида ($n > j$) определяется как сумма атомов, образовавшихся за счет распада какой-то части N_{10} атомов и N_{j0} атомов, имевшихся в начальный момент.

В этом случае

$$N_n = \lambda_1 \lambda_2 \dots \lambda_{n-1} \left[\frac{e^{-\lambda_1 t}}{(\lambda_2 - \lambda_1)(\lambda_3 - \lambda_1) \dots (\lambda_n - \lambda_1)} + \dots \right. \\ \left. \dots + \frac{e^{-\lambda_n t}}{(\lambda_1 - \lambda_n)(\lambda_2 - \lambda_n) \dots (\lambda_{n-1} - \lambda_n)} \right] N_{10} + \lambda_j \lambda_{j+1} \dots \lambda_{n-1} \times \\ \times \left[\frac{e^{-\lambda_j t}}{(\lambda_{j+1} - \lambda_j)(\lambda_{j+2} - \lambda_j) \dots (\lambda_n - \lambda_j)} + \dots + \frac{e^{-\lambda_n t}}{(\lambda_j - \lambda_n)(\lambda_{j+1} - \lambda_n) \dots (\lambda_{n-1} - \lambda_n)} \right] N_{j0}. \quad (2.30)$$

Эту формулу можно обобщить для случая, когда в начальный момент имеется любое количество атомов произвольного числа дочерних радионуклидов.

Используя значения ξ_j , можно рассчитать, например, активность источника с учетом всех $(n-1)$ дочерних продуктов по формуле

$$A = A_1 \left[1 + \sum_{j=2}^n \xi_j \right], \quad (2.31)$$

где A_1 — активность материнского продукта, коэффициент ξ_j определяется по формуле (2.26).

Наиболее полная информация о характеристиках около 1300 радионуклидов приведена в [34, 35].

В табл. 2.2 приведены характеристики около 100 наиболее широко используемых на практике радионуклидов, а также радионуклидов, образующихся в результате активации потоками нейтронов конструкционных и защитных материалов ядерно-технических установок.

Для каждого радионуклида указаны образующиеся первые дочерние продукты и период полураспада. Тип распада легко определить по изменению атомной массы и атомного номера с использованием табл. 1.6. Стабильные нуклиды подчеркнуты.

Если распад радионуклидов приводит к двум нуклидам, в скобках около каждого из них указана доля распада (выход), приводящая к этому нуклиду.

Если первый дочерний продукт радиоактивный, в гамма-постоянной следует учесть γ -излучение всех дочерних продуктов. Для этого следует найти место этого нуклида в цепочках радиоактивного распада (§ 2.6) [37] и учесть γ -излучение соответствующих дочерних продуктов по методике, изложенной выше.

Если для нуклида приводится информация с учетом γ -излучения дочернего продукта, в скобках рядом с периодом полураспада основного радионуклида указан период полураспада дочернего продукта. Приводимые для этого случая гамма-постоянные даются для равновесного состояния.

В некоторых случаях гамма-постоянные радионуклидов с малыми периодами полураспада приводятся, чтобы оценивать γ -излучение этих радионуклидов, являющихся дочерними продуктами нуклидов со значительно большими $T_{1/2}$. Например, гамма-постоянная ^{106}Rh ($T_{1/2} = 30$ с) необходима, чтобы рассчитать γ -излучение чистого β -излучателя ^{106}Ru ($T_{1/2} = 371,6$ сут) с дочерним продуктом ^{106}Rh .

В первом столбце табл. 2.2 приведена энергия фотонов E_{0i} и возможного KX -излучения. Знак « \pm » около энергии 0,511 МэВ означает, что эти фотоны возникли в процессе аннигиляции. Во втором — шестом столбцах в строчку приводятся для каждой энергии фотонов E_{0i} значения квантовых выходов n_i , фотон/распад, значения энергии γ -излучения, испускаемого на 1 распад ядра $E_{0i}n_i$, МэВ/распад, и дифференциальные гамма-постоянные $\Gamma_{K\gamma}$, $\Gamma_{H\gamma}$, $\Gamma_{H,\text{макс},i}$ соответственно. Под чертой для каждого нуклида приведены полный квантовый выход фотонов всех энергий Σn_i , полная энергия γ -излучения $\Sigma E_{0i}n_i$ и полные гамма-постоянные Γ_K , Γ_H , $\Gamma_{H,\text{макс}}$ соответственно.

Характеристики радионуклидов как γ -излучателей

Таблица 2.2

E_{0i} , МэВ	Квантовый выход на распад n_i , Σn_i , фотон/расп.	$E_{0i}n_i$, $\Sigma E_{0i}n_i$, МэВ/расп.	$\Gamma_{K\gamma}$, $\Gamma_K =$ $= \Sigma \Gamma_{K\gamma}$ аГр·м ² /(с·Бк)	$\Gamma_{H\gamma}$, $\Gamma_H =$ $= \Sigma \Gamma_{H\gamma}$ аЗв·м ² /(с·Бк)	$\Gamma_{H,\text{макс},i}$, $\Gamma_{H,\text{макс}} =$ $= \Sigma \Gamma_{H,\text{макс},i}$ аЗв·м ² /(с·Бк)
$^{16}\text{N} \rightarrow ^{16}\text{O}$; 7,13 с					
8,87	8,00—4	7,10—3	1,34—1	1,46—1	1,53—1
7,112	5,00—2	3,56—1	7,10+0	7,79+0	8,15+0
6,134	6,90—1	4,23+0	8,84+1	9,67+1	1,02+2
2,75	1,00—2	2,75—2	7,42—1	8,22—1	8,75—1
1,90	3,00—4	5,70—4	1,73—2	1,92—2	2,05—2
1,72	1,00—3	1,72—3	5,36—2	5,96—2	6,40—2
	7,52—1	4,62+0	9,64+1	1,06+2	1,11+2
$^{23}\text{Na} \rightarrow ^{23}\text{Ne}$; 2,6019 года					
1,275	9,99—1	1,27+0	4,29+1	4,76+1	5,19+1
0,511±	1,80+0	9,20—1	3,48+1	3,86+1	4,68+1

Продолжение табл. 2.2

	2,80+0	2,19+0	7,77+1	8,62+1	9,87+1
$^{24}\text{Na} \rightarrow ^{24}\text{Mg}$; 14,956 ч					
2,754	9,99—1	2,75+0	7,42+1	8,22+1	8,75+1
1,369	1,00+0	1,37+0	4,53+1	5,04+1	5,46+1
	2,00+0	4,12+0	1,20+2	1,33+2	1,42+2
$^{38}\text{Cl} \rightarrow ^{38}\text{Ar}$; 37,24 мин					
2,168	4,40—1	9,54—1	2,78+1	3,08+1	3,29+1
1,642	3,25—1	5,34—1	1,68+1	1,87+1	2,01+1
	7,65—1	1,49+0	4,46+1	4,95+1	5,30+1
$^{41}\text{Ar} \rightarrow ^{41}\text{K}$; 1,822 ч					
1,677	5,20—4	8,72—4	2,74—2	3,04—2	3,27—2
1,294	9,92—1	1,28+0	4,30+1	4,79+1	5,21+1
	9,92—1	1,28+0	4,30+1	4,79+1	5,21+1
$^{49}\text{K} \rightarrow ^{49}\text{Ar}$ (0,107), ^{40}Ca (0,893); $1,262 \cdot 10^9$ лет					
1,461	1,07—1	1,56—1	5,10+0	5,67+0	6,12+0
	1,07—1	1,56—1	5,10+0	5,67+0	6,12+0
$^{49}\text{K} \rightarrow ^{49}\text{Ca}$; 12,360 ч					
2,424	2,11—4	5,12—4	1,44—2	1,59—2	1,70—2
1,922	4,12—4	7,92—4	2,39—2	2,66—2	2,84—2
1,525	1,79—1	2,73—1	8,80+0	9,80+0	1,06+1
0,8994	5,16—4	4,64—4	1,68—2	1,87—2	2,09—2
0,3127	3,19—3	9,98—4	3,67—2	4,07—2	5,56—2
	1,83—1	2,76—1	8,89+0	9,90+0	1,07+1
$^{45}\text{Sc} \rightarrow ^{45}\text{Ti}$; 83,81 сут					
1,121	1,00+0	1,12+0	3,89+1	4,32+1	4,74+1
0,8892	1,00+0	8,89—1	3,23+1	3,58+1	4,02+1
	2,00+0	2,01+0	7,12+1	7,90+1	8,76+1

Продолжение табл. 2.2

E_{0i} , МэВ	Квантовый выход на распад $n_i, \Sigma n_i$, фотон/расп	$E_{0i} n_i$, $\Sigma E_{0i} n_i$, МэВ/расп.	$\Gamma_{K_i}, \Gamma_{K'} =$ $= \Sigma \Gamma_{K_i}$ аГр·м ² / (с·Бк)	$\Gamma_{H_i}, \Gamma_H =$ $= \Sigma \Gamma_{H_i}$ аЗв·м ² / (с·Бк)	$\Gamma_{H, макс, i}$ $\Gamma_{H, макс} =$ $= \Sigma \Gamma_{H, макс, i}$ аЗв·м ² / (с·Бк)
$^{48}\text{V} \rightarrow ^{48}\text{Ti}$; 15,974 сут					
2,240	2,41-2	5,40-2	1,56+0	1,72+0	1,84+0
1,312	9,75-1	1,28+0	4,28+1	4,75+1	5,17+1
0,9835	1,00+0	9,84-1	3,51+1	3,90+1	4,32+1
0,9441	7,76-2	7,33-2	2,63+0	2,92+0	3,26+0
0,9283	7,70-3	7,15-3	2,58-1	2,86-1	3,19-1
0,511±	1,00+0	5,11-1	1,93+1	2,14+1	2,60+1
	3,08+0	2,91+0	1,02+2	1,13+2	1,26+2
$^{54}\text{Cr} \rightarrow ^{54}\text{V}$; 27,690 сут					
0,3201	9,83-2	3,15-2	1,16+0	1,29+0	1,75+0
	9,83-2	3,15-2	1,16+0	1,29+0	1,75+0
$^{55}\text{Mn} \rightarrow ^{55}\text{Cr}$; 5,591 сут					
1,434	1,00+0	1,43+0	4,70+1	5,22+1	5,64+1
1,334	5,07-2	6,76-2	2,25+0	2,50+0	2,72+0
1,248	3,80-3	4,74-3	1,60-1	1,78-1	1,94-1
1,246	4,21-2	5,25-2	1,77+0	1,97+0	2,15+0
0,9355	9,45-1	8,84-1	3,18+1	3,53+1	3,94+1
0,8481	3,32-2	2,82-2	1,03+0	1,14+0	1,29+0
0,7442	9,00-1	6,70-1	2,49+1	2,76+1	3,17+1
0,511±	5,92-1	3,02-1	1,14+1	1,27+1	1,54+1
	3,57+0	3,44+0	1,20+2	1,34+2	1,49+2
$^{55}\text{Mn} \rightarrow ^{55}\text{Cr}$; 312,16 сут					
0,8348	1,00+0	8,35-1	3,05+1	3,39+1	3,84+1
	1,00+0	8,35-1	3,05+1	3,39+1	3,84+1
$^{55}\text{Mn} \rightarrow ^{56}\text{Fe}$; 2,579 ч					
3,370	1,68-3	5,66-3	1,43-1	1,58-1	1,68-1
2,960	3,06-3	9,06-3	2,39-1	2,64-1	2,81-1
2,657	6,53-3	1,74-2	4,74-1	5,25-1	5,58-1
2,523	9,89-3	2,50-2	6,92-1	7,67-1	8,17-1
2,113	1,43-1	3,02-1	8,86+0	9,84+0	1,05+1
1,811	2,72-1	4,93-1	1,51+1	1,68+1	1,80+1
0,8468	9,89-1	8,38-1	3,06+1	3,39+1	3,83+1
	1,42+0	1,69+0	5,61+1	6,23+1	6,87+1

Продолжение табл. 2.2

E_{0i} , МэВ	Квантовый выход на распад $n_i, \Sigma n_i$, фотон/расп	$E_{0i} n_i$, $\Sigma E_{0i} n_i$, МэВ/расп.	$\Gamma_{K_i}, \Gamma_{K'} =$ $= \Sigma \Gamma_{K_i}$ аГр·м ² / (с·Бк)	$\Gamma_{H_i}, \Gamma_H =$ $= \Sigma \Gamma_{H_i}$ аЗв·м ² / (с·Бк)	$\Gamma_{H, макс, i}$ $\Gamma_{H, макс} =$ $= \Sigma \Gamma_{H, макс, i}$ аЗв·м ² / (с·Бк)
$^{58}\text{Fe} \rightarrow ^{58}\text{Co}$; 44,496 сут					
1,292	4,36-1	5,63-1	1,89+1	2,10+1	2,28+1
1,099	5,61-1	6,16-1	2,15+1	2,38+1	2,62+1
0,1923	3,00-2	5,77-3	1,95-1	2,16-1	3,20-1
0,1426	1,00-2	1,43-3	4,49-2	4,97-2	8,08-2
	1,04+0	1,19+0	4,06+1	4,51+1	4,94+1
$^{59}\text{Co} \rightarrow ^{59}\text{Fe}$; 78,76 сут					
3,548	1,73-3	6,14-3	1,52-1	1,68-1	1,78-1
3,451	8,89-3	3,07-2	7,68-1	8,49-1	9,01-1
3,273	1,73-2	5,66-2	1,44+0	1,60+0	1,69+0
3,254	7,39-2	2,40-1	6,14+0	6,79+0	7,21+0
3,202	3,02-2	9,67-2	2,48+0	2,75+0	2,92+0
3,010	1,03-2	3,10-2	8,13-1	9,00-1	9,56-1
2,599	1,67-1	4,34-1	1,19+1	1,32+1	1,41+1
2,213	3,76-3	8,32-3	2,41-1	2,67-1	2,85-1
2,113	3,76-3	7,94-3	2,33-1	2,59-1	2,76-1
2,035	7,77-2	1,58-1	4,69+0	5,21+0	5,57+0
2,015	3,03-2	6,10-2	1,82+0	2,02+0	2,16+0
1,964	7,02-3	1,38-2	4,14-1	4,60-1	4,92-1
1,811	6,50-3	1,18-2	3,62-1	4,02-1	4,31-1
1,771	1,55-1	2,74-1	8,48+0	9,43+0	1,01+1
1,360	4,29-2	5,83-2	1,93+0	2,15+0	2,33+0
1,238	6,70-1	8,30-1	2,81+1	3,12+1	3,41+1
1,175	2,26-2	2,66-2	9,11-1	1,01+0	1,11+0
1,038	1,41-1	1,46-1	5,16+0	5,73+0	6,33+0
0,9774	1,40-2	1,37-2	4,89-1	5,43-1	6,02-1
0,8468	9,99-1	8,46-1	3,09+1	3,43+1	3,87+1
0,511±	3,97-1	2,03-1	7,66+0	8,52+0	1,03+1
	2,88+0	3,55+0	1,15+2	1,28+2	1,41+2
$^{60}\text{Co} \rightarrow ^{60}\text{Fe}$; 271,80 сут					
0,6920	1,60-3	1,11-3	4,15-2	4,60-2	5,34-2
0,1365	1,06-1	1,45-2	4,52-1	5,00-1	8,30-1
0,1221	8,56-1	1,04-1	3,20+0	3,53+0	6,18+0
	9,64-1	1,20-1 (1,25-1)	3,69+0	4,08+0	7,06+0

Продолжение табл. 2.2

E_{0i} , МэВ	Квантовый выход на распад λ_i , $\Sigma \lambda_i$, фотон/расп.	$E_{0i} \lambda_i$, $\Sigma E_{0i} \lambda_i$, МэВ/расп.	$\Gamma_{K\beta}$, $\Gamma_K =$ $= \Sigma \Gamma_{K\beta}$ аГр·м ² /(с·Бк)	$\Gamma_{H\beta}$, $\Gamma_H =$ $= \Sigma \Gamma_{H\beta}$ аЗв·м ² /(с·Бк)	$\Gamma_{H, макс, i}$, $\Gamma_{H, макс} =$ $= \Sigma \Gamma_{H, макс, i}$ аЗв·м ² /(с·Бк)
$^{58}\text{Co} \rightarrow ^{58}\text{Fe}$; 70,92 сут					
1,675	5,17-3	8,66-3	2,72-1	3,02-1	3,25-1
0,8639	6,76-3	5,84-3	2,13-1	2,36-1	2,66-1
0,8108	9,94-1	8,06-1	2,96+1	3,28+1	3,73+1
0,511±	3,00-1	1,53-1	5,79+0	6,44+0	7,80+0
	1,30+0	9,74-1 (9,75-1)	3,59+1	3,98+1	4,57+1
$^{60}\text{Co} \rightarrow ^{60}\text{Ni}$; 5,2709 года					
1,332	1,00+0	1,33+0	4,44+1	4,93+1	5,36+1
1,173	9,99-1	1,17+0	4,02+1	4,47+1	4,89+1
	2,00+0	2,50+0	8,46+1	9,40+1	1,02+2
$^{64}\text{Cu} \rightarrow ^{64}\text{Zn}$ (0,372), ^{64}Ni (0,628); 12,703 ч					
1,346	4,90-3	6,60-3	2,19-1	2,44-1	2,64-1
0,511±	3,58-1	1,83-1	6,91+0	7,68+0	9,30+0
	3,63-1	1,90-1	7,13+0	7,92+0	9,56+0
$^{65}\text{Zn} \rightarrow ^{65}\text{Cu}$; 243,9 сут					
1,116	5,07-1	5,66-1	1,96+1	2,18+1	2,40+1
0,511±	2,92-2	1,49-2	5,64-1	6,26-1	7,59-1
	5,36-1	5,81-1 (5,84-1)	2,02+1	2,24+1	2,48+1
$^{73}\text{As} \rightarrow ^{73}\text{Ge}$; 80,30 сут					
0,05344	1,05-1	5,61-3	2,60-1	2,68-1	6,52-1
	1,05-1	5,61-3 (1,61-2)	2,60-1	2,68-1	6,52-1
$^{74}\text{As} \rightarrow ^{74}\text{Se}$ (0,342), ^{74}Ge (0,658); 17,77 сут					
1,204	2,90-3	3,49-3	1,19-1	1,32-1	1,45-1
0,6350	1,42-3	9,02-4	3,39-2	3,76-2	4,45-2
0,6348	1,54-1	9,78-2	3,67+0	4,08+0	4,82+0
0,6084	5,33-3	3,24-3	1,22-1	1,36-1	1,62-1
0,5958	5,92-1	3,53-1	1,33+1	1,48+1	1,77+1
0,511±	5,82-1	2,97-1	1,12+1	1,25+1	1,51+1
	1,34+0	7,56-1	2,85+1	3,16+1	3,80+1

Продолжение табл. 2.2

E_{0i} , МэВ	Квантовый выход на распад λ_i , $\Sigma \lambda_i$, фотон/расп.	$E_{0i} \lambda_i$, $\Sigma E_{0i} \lambda_i$, МэВ/расп.	$\Gamma_{K\beta}$, $\Gamma_K =$ $= \Sigma \Gamma_{K\beta}$ аГр·м ² /(с·Бк)	$\Gamma_{H\beta}$, $\Gamma_H =$ $= \Sigma \Gamma_{H\beta}$ аЗв·м ² /(с·Бк)	$\Gamma_{H, макс, i}$, $\Gamma_{H, макс} =$ $= \Sigma \Gamma_{H, макс, i}$ аЗв·м ² /(с·Бк)
$^{76}\text{As} \rightarrow ^{76}\text{Se}$; 26,32 ч					
2,655	4,92-4	1,31-3	3,57-2	3,95-2	4,20-2
2,429	3,93-4	9,55-4	2,68-2	2,97-2	3,17-2
2,111	3,93-3	8,30-3	2,44-1	2,70-1	2,89-1
2,096	6,62-3	1,39-2	4,08-1	4,53-1	4,84-1
1,869	6,26-4	1,17-3	3,56-2	3,96-2	4,24-2
1,788	3,31-3	5,92-3	1,82-1	2,03-1	2,17-1
1,533	2,91-4	4,46-4	1,44-2	1,60-2	1,72-2
1,454	1,30-3	1,89-3	6,17-2	6,86-2	7,41-2
1,439	3,26-3	4,69-3	1,54-1	1,71-1	1,84-1
1,229	1,39-2	1,71-2	5,80-1	6,44-1	7,03-1
1,216	3,84-2	4,67-2	1,59+0	1,76+0	1,93+0
1,213	1,63-2	1,98-2	6,73-1	7,48-1	8,17-1
1,130	1,43-3	1,62-3	5,59-2	6,21-2	6,82-2
0,8820	6,26-4	5,52-4	2,00-2	2,23-2	2,50-2
0,8676	1,25-3	1,08-3	3,95-2	4,38-2	4,93-2
0,7718	1,16-3	8,95-4	3,31-2	3,67-2	4,20-2
0,7401	1,16-3	8,58-4	3,19-2	3,54-2	4,07-2
0,6653	3,93-3	2,62-3	9,81-2	1,09-1	1,28-1
0,6570	6,08-2	4,00-2	1,50+0	1,66+0	1,95+0
0,5713	1,39-3	7,94-4	2,99-2	3,33-2	3,99-2
0,5632	1,17-2	6,59-3	2,48-1	2,76-1	3,32-1
0,5591	4,47-1	2,50-1	9,43+0	1,05+1	1,26+1
	6,19-1	4,27-1	1,55+1	1,72+1	2,01+1
$^{75}\text{Se} \rightarrow ^{75}\text{As}$; 119,779 сут					
0,4006	1,13-1	4,53-2	1,70+0	1,89+0	2,46+0
0,3039	1,31-2	3,98-3	1,46-1	1,62-1	2,22-1
0,2795	2,52-1	7,04-2	2,55+0	2,83+0	3,93+0
0,2647	5,94-1	1,57-1	5,64+0	6,25+0	8,76+0
0,1986	1,50-2	2,98-3	1,01-1	1,13-1	1,65-1
0,1360	6,06-1	8,24-2	2,57+0	2,84+0	4,73+0
0,1211	1,77-1	2,14-2	6,56-1	7,22-1	1,27+0
0,09673	3,50-2	3,39-3	1,01-1	1,10-1	2,16-1
0,06605	1,10-2	7,27-4	2,54-2	2,69-2	6,33-2
	1,82+0	3,88-1 (3,94-1)	1,35+1	1,50+1	2,18+1
$^{82}\text{Br} \rightarrow ^{82}\text{Kr}$; 35,32 ч					
1,650	7,43-3	1,23-2	3,87-1	4,30-1	4,62-1

Продолжение табл. 2.2

E_{0i} , МэВ	Квантовый выход на распад $\lambda_i, \Sigma \lambda_i$, фотон/расп.	$E_{0i} \lambda_i$, $\Sigma E_{0i} \lambda_i$, МэВ/расп.	$\Gamma_{Kr}, \Gamma_K =$ $= \Sigma \Gamma_{Kr}$ аГр·м ² /(с·Бк)	$\Gamma_{Hr}, \Gamma_H =$ $= \Sigma \Gamma_{Hr}$ аЗв·м ² /(с·Бк)	$\Gamma_{H, макс. i}$ $\Gamma_{H, макс. i} =$ $= \Sigma \Gamma_{H, макс. i}$ аЗв·м ² /(с·Бк)
1,475	1,63-1	2,40-1	7,82+0	8,70+0	9,38+0
1,317	2,65-1	3,49-1	1,16+1	1,30+1	1,41+1
1,081	6,27-3	6,78-3	2,37-1	2,63-1	2,90-1
1,044	2,72-1	2,84-1	1,00+1	1,11+1	1,23+1
1,008	1,27-2	1,28-2	4,55-1	5,05-1	5,59-1
0,9521	3,68-3	3,50-3	1,26-1	1,40-1	1,55-1
0,8278	2,40-1	1,99-1	7,27+0	8,06+0	9,15+0
0,7765	8,36-1	6,49-1	2,40+1	2,66+1	3,04+1
0,6983	2,85-1	1,99-1	7,45+0	8,27+0	9,58+0
0,6191	4,35-1	2,69-1	1,01+1	1,12+1	1,34+1
0,6063	1,17-2	7,09-3	2,67-1	2,97-1	3,54-1
0,5543	7,08-1	3,92-1	1,48+1	1,64+1	1,98+1
0,2214	2,26-2	5,00-3	1,74-1	1,93-1	2,78-1
	3,27+0	2,63+0	9,47+1	1,05+2	1,20+2
		$^{86}Kr \rightarrow ^{86}Rb$; 10,72 года			
0,5140	4,30-3	2,21-3	8,35-2	9,28-2	1,12-1
	4,30-3	2,21-3	8,35-2	9,28-2	1,12-1
		$^{85m}Kr \rightarrow ^{85}Kr$ (0,211), ^{85}Rb (0,789); 4,48 ч			
0,3049	1,40-1	4,27-2	1,57+0	1,74+0	2,38+0
0,1512	7,55-1	1,14-1	3,63+0	4,03+0	6,38+0
0,1298	3,00-3	3,89-4	1,20-2	1,33-2	2,26-2
	8,98-1	1,57-1 (1,58-1)	5,21+0	5,78+0	8,78+0
		$^{84}Rb \rightarrow ^{84}Kr$ (0,964), ^{84}Sr (0,036); 32,9 сут			
1,897	7,80-3	1,48-2	4,48-1	4,98-1	5,33-1
1,016	4,30-3	4,37-3	1,55-1	1,72-1	1,90-1
0,8815	7,10-1	6,26-1	2,27+1	2,52+1	2,83+1
0,511±	5,26-1	2,69-1	1,02+1	1,13+1	1,37+1
	1,25+0	9,14-1 (9,18-1)	3,35+1	3,72+1	4,27+1
		$^{86}Rb \rightarrow ^{86}Sr$; 18,63 сут			
1,077	8,78-2	9,46-2	3,31+0	3,67+0	4,05+0
	8,78-2	9,46-2	3,31+0	3,67+0	4,05+0

Продолжение табл. 2.2

E_{0i} , МэВ	Квантовый выход на распад $\lambda_i, \Sigma \lambda_i$, фотон/расп.	$E_{0i} \lambda_i$, $\Sigma E_{0i} \lambda_i$, МэВ/расп.	$\Gamma_{Kr}, \Gamma_K =$ $= \Sigma \Gamma_{Kr}$ аГр·м ² /(с·Бк)	$\Gamma_{Hr}, \Gamma_H =$ $= \Sigma \Gamma_{Hr}$ аЗв·м ² /(с·Бк)	$\Gamma_{H, макс. i}$ $\Gamma_{H, макс. i} =$ $= \Sigma \Gamma_{H, макс. i}$ аЗв·м ² /(с·Бк)
		$^{87m}Sr \rightarrow ^{87}Sr$ (0,997), ^{87}Rb (0,003); 2,82 ч			
0,3884	8,21-1	3,19-1	1,19+1	1,33+1	1,74+1
	8,21-1	3,19-1 (3,20-1)	1,19+1	1,33+1	1,74+1
		$^{88}Sr \rightarrow ^{88}Y$; 50,62 сут			
0,9091	9,30-5	8,46-5	3,06-3	3,40-3	3,80-3
	9,30-5	8,46-5	3,06-3	3,40-3	3,80-3
		$^{89m}Y \rightarrow ^{89}Y$; 3,19 ч			
0,6820	3,60-3	2,46-3	9,20-2	1,02-1	1,19-1
0,4795	9,00-1	4,32-1	1,63+1	1,81+1	2,23+1
0,2025	9,58-1	1,94-1	6,62+0	7,36+0	1,08+1
	1,86+0	6,28-1	2,30+1	2,56+1	3,32+1
		$^{91}Y \rightarrow ^{91}Zr$; 58,51 сут			
1,205	3,00-3	3,62-3	1,23-1	1,37-1	1,50-1
	3,00-3	3,62-3	1,23-1	1,37-1	1,50-1
		$^{95}Zr \rightarrow ^{95m}Nb$ (0,00698), ^{95}Nb (0,993); 64,02 сут			
0,7567	5,50-1	4,16-1	1,54+1	1,71+1	1,96+1
0,7242	4,45-1	3,22-1	1,20+1	1,33+1	1,54+1
	9,95-1	7,38-1	2,74+1	3,04+1	3,50+1
		$^{95}Zr + ^{95m}Nb \rightarrow ^{95}Nb$; 64,02 сут (3,61 сут)			
0,7567	5,50-1	4,16-1	1,54+1	1,71+1	1,96+1
0,7242	4,45-1	3,22-1	1,20+1	1,33+1	1,54+1
0,2347	1,80-3	4,22-4	1,48-2	1,64-2	2,35-2
	9,97-1	7,39-1	2,74+1	3,04+1	3,50+1
		$^{95m}Nb \rightarrow ^{95}Nb$; 3,61 сут			
0,2347	2,59-1	6,08-2	2,13+0	2,37+0	3,38+0
	2,59-1	6,08-2 (6,83-2)	2,13+0	2,37+0	3,38+0

Продолжение табл. 2.2

E_{0i} , МэВ	Квантовый выход на распад $\lambda_i, \Sigma \lambda_i$, фотон/расп.	$E_{0i} \lambda_i$, $\Sigma E_{0i} \lambda_i$, МэВ/расп.	$\Gamma_{Ki}, \Gamma_{K'} =$ $= \Sigma \Gamma_{Ki}$ аГр·м ² /(с·Бк)	$\Gamma_{Hi}, \Gamma_H =$ $= \Sigma \Gamma_{Hi}$ аЗв·м ² /(с·Бк)	$\Gamma_{H, макс. i}$ $\Gamma_{H, макс} =$ $= \Sigma \Gamma_{H, макс. i}$ аЗв·м ² /(с·Бк)
$^{95}\text{Nb} \rightarrow ^{95}\text{Mo}$; 34,979 сут					
0,7658	1,00+0	7,66-1	2,83+1	3,14+1	3,60+1
	1,00+0	7,66-1	2,83+1	3,14+1	3,60+1
$^{99}\text{Mo} \rightarrow ^{99m}\text{Tc}$ (0,876), ^{99}Tc (0,124); 66,02 ч					
0,9608	9,76-4	9,38-4	3,36-2	3,73-2	4,15-2
0,8230	1,33-3	1,10-3	4,01-2	4,47-2	5,05-2
0,7779	4,32-2	3,36-2	1,24+0	1,38+0	1,57+0
0,7395	1,22-1	9,02-2	3,35+0	3,72+0	4,28+0
0,6218	2,60-4	1,62-4	6,08-3	6,75-3	8,02-3
0,5288	5,45-4	2,88-4	1,09-2	1,21-2	1,46-2
0,3664	1,19-2	4,36-3	1,62-1	1,81-1	2,39-1
0,1811	6,06-2	1,10-2	3,65-1	4,05-1	6,10-1
0,1405	4,95-2	6,96-3	2,18-1	2,42-1	3,96-1
0,04059	1,16-2	4,71-4	3,90-2	3,95-2	9,14-2
	3,02-1	1,49-1 (1,50-1)	5,47+0	6,06+0	7,30+0
$^{99m}\text{Tc} \rightarrow ^{99}\text{Tc}$; 6,012 ч					
0,1405	8,89-1	1,25-1	3,92+0	4,34+0	7,10+0
	8,89-1	1,25-1 (1,26-1)	3,92+0	4,34+0	7,10+0
$^{103}\text{Ru} \rightarrow ^{103m}\text{Rh}$ (0,997), ^{103}Rh (0,003); 39,254 сут					
0,6120	7,68-4	4,70-4	1,77-2	1,96-2	2,34-2
0,6103	5,28-2	3,22-2	1,21-2	1,35-2	1,60-2
0,5570	7,57-3	4,22-3	1,59-1	1,77-1	2,13-1
0,4971	8,64-1	4,30-1	1,62+1	1,80+1	2,19+1
0,4438	3,08-3	1,37-3	5,14-2	5,72-2	7,22-2
0,2950	2,41-3	7,11-4	2,60-2	2,88-2	3,97-2
	9,31-1	4,69-1	1,77+1	1,97+1	2,39+1
$^{103m}\text{Rh} \rightarrow ^{103}\text{Rh}$; 56, 114 мин					
0,03975	6,99-4	2,78-5	2,42-3	2,45-3	5,64-3
	6,99-4	2,78-5 (1,75-3)	2,42-3	2,45-3	5,64-3

Продолжение табл. 2.2

E_{0i} , МэВ	Квантовый выход на распад $\lambda_i, \Sigma \lambda_i$, фотон/расп.	$E_{0i} \lambda_i$, $\Sigma E_{0i} \lambda_i$, МэВ/расп.	$\Gamma_{Ki}, \Gamma_{K'} =$ $= \Sigma \Gamma_{Ki}$ аГр·м ² /(с·Бк)	$\Gamma_{Hi}, \Gamma_H =$ $= \Sigma \Gamma_{Hi}$ аЗв·м ² /(с·Бк)	$\Gamma_{H, макс. i}$ $\Gamma_{H, макс} =$ $= \Sigma \Gamma_{H, макс. i}$ аЗв·м ² /(с·Бк)
$^{106}\text{Rh} \rightarrow ^{106}\text{Pd}$; 30 с					
2,406	1,24-4	2,98-4	8,40-3	9,32-3	9,93-3
2,366	2,14-4	5,06-4	1,43-2	1,59-2	1,70-2
2,113	3,21-4	6,78-4	1,99-2	2,21-2	2,36-2
1,988	2,20-4	4,37-4	1,31-2	1,45-2	1,55-2
1,797	2,53-4	4,55-4	1,40-2	1,56-2	1,67-2
1,766	2,33-4	4,12-4	1,27-2	1,42-2	1,52-2
1,562	1,46-3	2,28-3	7,30-2	8,13-2	8,74-2
1,496	2,57-4	3,84-4	1,25-2	1,39-2	1,49-2
1,194	5,27-4	6,29-4	2,15-2	2,39-2	2,61-2
1,128	3,85-3	4,34-3	1,50-1	1,67-1	1,83-1
1,062	2,47-4	2,62-4	9,21-3	1,02-2	1,13-2
1,050	1,46-2	1,53-2	5,40-1	5,99-1	6,61-1
0,8731	4,16-3	3,63-3	1,32-1	1,47-1	1,65-1
0,6218	9,81-2	6,10-2	2,29+0	2,55+0	3,02+0
0,6162	7,00-3	4,31-3	1,62-1	1,80-1	2,14-1
0,5118	2,06-1	1,05-1	3,98+0	4,43+0	5,36+0
0,4350	4,74-4	2,06-4	7,76-3	8,63-3	1,10-2
0,4279	9,27-4	3,97-4	1,49-2	1,66-2	2,12-2
	3,39-1	2,01-1	7,48+0	8,31+0	9,88+0
$^{110m}\text{Ag} \rightarrow ^{110}\text{Ag}$ (0,0133), ^{110}Cd (0,9867); 249,76 сут					
1,562	1,18-2	1,84-2	5,90-1	6,57-1	7,07-1
1,505	1,31-1	1,97-1	6,38+0	7,10+0	7,65+0
1,476	3,99-2	5,89-2	1,92+0	2,13+0	2,30+0
1,384	2,43-1	3,36-1	1,11+1	1,24+1	1,34+1
0,9375	3,43-1	3,22-1	1,16+1	1,28+1	1,43+1
0,8847	7,29-1	6,45-1	2,34+1	2,60+1	2,92+1
0,8180	7,32-2	5,99-2	2,19+0	2,43+0	2,77+0
0,7639	2,24-1	1,71-1	6,33+0	7,02+0	8,05+0
0,7443	4,66-2	3,47-2	1,29+0	1,43+0	1,64+0
0,7067	1,67-1	1,18-1	4,41+0	4,90+0	5,67+0
0,6870	6,49-2	4,46-2	1,67+0	1,86+0	2,16+0
0,6776	1,07-1	7,25-2	2,72+0	3,02+0	3,52+0
0,6577	9,47-1	6,23-1	2,34+1	2,60+1	3,04+1
0,6203	2,78-2	1,72-2	6,49-1	7,20-1	8,56-1
0,4468	3,66-2	1,64-2	6,16-1	6,85-1	8,61-1
	3,19+0	2,74+0	9,82+1	1,09+2	1,24+2
$^{110}\text{Ag} \rightarrow ^{110}\text{Cd}$ (0,997), ^{110}Pd (0,003); 24,6 с					
2,005	3,60-5	7,22-5	2,15-3	2,39-3	2,56-3

Продолжение табл. 2.2

E_{0i} , МэВ	Квантовый выход на распад $n_i, \Sigma n_i$, фотон/расп.	$E_{0i} n_i$, $\Sigma E_{0i} n_i$, МэВ/расп.	$\Gamma_{K_i} \Gamma_{K_i} =$ $= \Sigma \Gamma_{K_i}^2$ аГр·м ² /(с·Бк)	$\Gamma_{H_i} \Gamma_{H_i} =$ $= \Sigma \Gamma_{H_i}^2$ аЗв·м ² /(с·Бк)	$\Gamma_{H, \max, i}^*$ $\Gamma_{H, \max} =$ $= \Sigma \Gamma_{H, \max, i}^*$ аЗв·м ² /(с·Бк)
1,783	4,50—5	8,02—5	2,48—3	2,75—3	2,95—3
1,674	7,19—5	1,20—4	3,78—3	4,20—3	4,51—3
1,630	2,25—5	3,67—5	1,16—3	1,29—3	1,39—3
1,476	3,60—5	5,31—5	1,73—3	1,92—3	2,07—3
1,421	2,25—5	3,20—5	1,05—3	1,17—3	1,26—3
1,187	2,70—5	3,20—5	1,10—3	1,22—3	1,33—3
1,126	1,53—4	1,72—4	5,97—3	6,63—3	7,28—3
0,8180	8,99—5	7,35—5	2,70—3	2,99—3	3,40—3
0,8153	3,82—4	3,11—4	1,14—2	1,27—2	1,44—2
0,6577	4,50—2	2,96—2	1,11+0	1,23+0	1,45+0
	4,59—2	3,06—2	1,14+0	1,27+0	1,49+0
		¹¹⁷ Ag → ¹¹³ Cd; 7,45 сут			
0,8685	4,92—5	4,27—5	1,56—3	1,72—3	1,94—3
0,8628	6,15—5	5,31—5	1,93—3	2,14—3	2,42—3
0,6231	8,73—5	5,44—5	2,05—3	2,27—3	2,70—3
0,6190	1,03—4	6,38—5	2,40—3	2,66—3	3,16—3
0,6174	8,98—5	5,54—5	2,09—3	2,32—3	2,75—3
0,3421	6,69—2	2,29—2	8,48—1	9,42—1	1,26+0
0,2454	1,23—2	3,02—3	1,07—1	1,18—1	1,68—1
0,09675	1,21—3	1,17—4	3,48—3	3,80—3	7,45—3
	8,08—2	2,63—2	9,68—1	1,08+0	1,45+0
		¹⁰⁹ Cd → ¹⁰⁹ Ag; 462,6 сут			
0,08803	3,61—2	3,18—3	9,56—2	1,04—1	2,14—1
	3,61—2	3,18—3 (2,64—2)	9,56—2	1,04—1	2,14—1
		¹¹³ mIn → ¹¹³ In; 99,51 мин			
0,3917	6,42—1	2,52—1	9,42+0	1,05+1	1,37+1
	6,42—1	2,52—1 (2,57—1)	9,42+0	1,05+1	1,37+1
		¹¹⁴ mIn → ¹¹⁴ Cd (0,043), ¹¹⁴ In (0,957); 49,51 сут			
0,7252	4,33—2	3,14—2	1,17+0	1,30+0	1,50+0
0,5584	4,39—2	2,45—2	9,25—1	1,03+0	1,24+0
0,1903	1,54—1	2,93—2	9,86—1	1,10+0	1,63+0

Продолжение табл. 2.2

E_{0i} , МэВ	Квантовый выход на распад $n_i, \Sigma n_i$, фотон/расп.	$E_{0i} n_i$, $\Sigma E_{0i} n_i$, МэВ/расп.	$\Gamma_{K_i} \Gamma_{K_i} =$ $= \Sigma \Gamma_{K_i}^2$ аГр·м ² /(с·Бк)	$\Gamma_{H_i} \Gamma_{H_i} =$ $= \Sigma \Gamma_{H_i}^2$ аЗв·м ² /(с·Бк)	$\Gamma_{H, \max, i}^*$ $\Gamma_{H, \max} =$ $= \Sigma \Gamma_{H, \max, i}^*$ аЗв·м ² /(с·Бк)
	2,41—1	8,52—2 (9,42—2)	3,08+1	3,43+1	4,37+1
		¹¹⁴ In → ¹¹⁴ Sn (0,9946), ¹¹⁴ Cd (0,0054); 71,9 с			
1,300	2,01—3	2,61—3	8,75—2	9,73—2	1,06—1
0,5758	5,15—5	2,96—5	1,12—3	1,24—3	1,49—3
0,5584	5,15—5	2,88—5	1,08—3	1,20—3	1,45—3
0,511 ±	4,33—5	2,21—5	8,36—4	9,29—4	1,12—3
	2,16—3	2,69—3 (2,79—3)	9,05—2	1,01—1	1,10—1
		¹¹⁵ mIn → ¹¹⁵ In (0,95), ¹¹⁵ Sn (0,05); 4,468 ч			
0,4971	4,70—4	2,34—4	8,83—3	9,81—3	1,19—2
0,3362	4,54—1	1,53—1	5,65+0	6,27+0	8,44+0
	4,54—1	1,53—1 (1,61—1)	5,66+0	6,28+0	8,45+0
		¹¹³ Sn → ¹¹³ mIn; 115,09 сут			
0,2551	1,85—2	4,72—3	1,68—1	1,86—1	2,63—1
	1,85—2	4,72—3 (2,28—2)	1,68—1	1,86—1	2,63—1
		¹²³ Sn → ¹²³ Sb; 129,2 сут			
1,337	7,56—6	1,01—5	3,36—4	3,74—4	4,06—4
1,089	6,00—3	6,53—3	2,28—1	2,53—1	2,79—1
1,030	3,10—4	3,19—4	1,13—2	1,25—2	1,38—2
1,021	1,93—5	1,97—5	6,98—4	7,75—4	8,57—4
	6,34—3	6,88—3	2,40—1	2,67—1	2,94—1
		¹²⁰ mSb → ¹²⁰ Sn; 5,76 сут			
1,172	1,00+0	1,17+0	4,02+1	4,47+1	4,89+1
1,113	1,30—2	1,45—2	5,02—1	5,58—1	6,13—1
1,023	9,90—1	1,01+0	3,59+1	3,98+1	4,40+1
0,1973	8,80—1	1,74—1	5,89+0	6,55+0	9,62+0
0,0898	8,00—1	7,18—2	2,16+0	2,35+0	4,76+0
	3,68+0	2,44+0 (2,47+0)	8,46+1	9,40+1	1,08+2

Продолжение табл. 2.2

E_{0i} , МэВ	Квантовый выход на распад $\lambda_i, \Sigma \lambda_i$, фотон/расп.	E_{0i}, λ_i , $\Sigma E_{0i}, \lambda_i$, МэВ/расп.	$\Gamma_{Ki}, \Gamma_K =$ $= \Sigma \Gamma_{Ki}$ аГр·м ² /(с·Бк)	$\Gamma_{Hi}, \Gamma_H =$ $= \Sigma \Gamma_{Hi}$ аЗв·м ² /(с·Бк)	$\Gamma_{H, макс. i}$ $\Gamma_{H, макс} =$ $= \Sigma \Gamma_{H, макс. i}$ аЗв·м ² /(с·Бк)
$^{124}\text{Sb} \rightarrow ^{124}\text{Te}$; 60,20 сут					
2,092	9,79-4	2,05-3	6,03-2	6,69-2	7,15-2
2,091	5,48-2	1,15-1	3,37+0	3,74+0	4,00+0
1,691	4,77-1	8,07-1	2,53+1	2,81+1	3,02+1
1,580	1,96-3	3,10-3	9,89-2	1,10-1	1,18-1
1,526	3,82-3	5,83-3	1,88-1	2,09-1	2,25-1
1,489	5,38-3	8,01-3	2,60-1	2,89-1	3,12-1
1,445	2,06-3	2,98-3	9,73-2	1,08-1	1,17-1
1,437	9,98-3	1,43-2	4,69-1	5,22-1	5,64-1
1,376	4,21-3	5,79-3	1,92-1	2,13-1	2,31-1
1,368	2,30-2	3,15-2	1,04+0	1,16+0	1,26+0
1,355	9,10-3	1,23-2	4,09-1	4,55-1	4,93-1
1,325	1,38-2	1,83-2	6,10-1	6,78-1	7,36-1
1,045	1,80-2	1,88-2	6,63-1	7,36-1	8,12-1
0,9682	1,79-2	1,73-2	6,20-1	6,88-1	7,65-1
0,7908	7,23-3	5,72-3	2,10-1	2,33-1	2,67-1
0,7228	1,10-1	7,95-2	2,96+0	3,29+0	3,80+0
0,7138	2,33-2	1,66-2	6,21-1	6,89-1	7,96-1
0,7093	1,38-2	9,79-3	3,66-1	4,06-1	4,70-1
0,6458	7,05-2	4,55-2	1,71+0	1,90+0	2,24+0
0,6027	9,58-1	5,77-1	2,17+1	2,42+1	2,89+1
0,4000	5,11-3	2,04-3	7,66-2	8,53-2	1,11-1
	1,83+0	1,80+0	6,10+1	6,78+1	7,64+1
$^{131}\text{I} \rightarrow ^{131m}\text{Xe} (0,0111), ^{131}\text{Xe} (0,9889)$; 8,0123 сут					
0,7229	1,80-2	1,30-2	4,85-1	5,38-1	6,21-1
0,6427	2,20-3	1,41-3	5,31-2	5,90-2	6,95-2
0,6370	7,27-2	4,63-2	1,74+0	1,93+0	2,28+0
0,5030	3,61-3	1,82-3	6,86-2	7,62-2	9,25-2
0,3645	8,12-1	2,96-1	1,10+1	1,22+1	1,62+1
0,3258	2,51-3	8,18-4	3,02-2	3,35-2	4,54-2
0,2843	6,06-2	1,72-2	6,26-1	6,94-1	9,62-1
0,1772	2,65-3	4,70-4	1,55-2	1,72-2	2,61-2
0,08018	2,62-2	2,10-3	6,40-2	6,90-2	1,51-1
	1,00+0	3,79-1 (3,80-1)	1,41+1	1,57+1	2,05+1
$^{133}\text{I} \rightarrow ^{133m}\text{Xe} (0,0290), ^{133}\text{Xe} (0,9710)$; 20,9 ч					
1,350	1,48-3	2,00-3	6,63-2	7,38-2	8,00-2
1,298	2,33-2	3,02-2	1,01+0	1,13+0	1,22+0

Продолжение табл. 2.2

E_{0i} , МэВ	Квантовый выход на распад $\lambda_i, \Sigma \lambda_i$, фотон/расп.	E_{0i}, λ_i , $\Sigma E_{0i}, \lambda_i$, МэВ/расп.	$\Gamma_{Ki}, \Gamma_K =$ $= \Sigma \Gamma_{Ki}$ аГр·м ² /(с·Бк)	$\Gamma_{Hi}, \Gamma_H =$ $= \Sigma \Gamma_{Hi}$ аЗв·м ² /(с·Бк)	$\Gamma_{H, макс. i}$ $\Gamma_{H, макс} =$ $= \Sigma \Gamma_{H, макс. i}$ аЗв·м ² /(с·Бк)
1,236	1,49-2	1,84-2	6,24-1	6,94-1	7,57-1
1,060	1,37-3	1,45-3	5,10-2	5,66-2	6,24-2
1,052	5,52-3	5,81-3	2,04-1	2,27-1	2,50-1
0,9097	2,12-3	1,93-3	6,97-2	7,74-2	8,66-2
0,8753	4,47-2	3,91-2	1,42+0	1,58+0	1,78+0
0,8563	1,23-2	1,05-2	3,84-1	4,26-1	4,81-1
0,8205	1,54-3	1,26-3	4,63-2	5,14-2	5,83-2
0,7684	4,57-3	3,51-3	1,30-1	1,44-1	1,65-1
0,7066	1,49-2	1,05-2	3,94-1	4,37-1	5,06-1
0,6802	6,45-3	4,39-3	1,64-1	1,83-1	2,13-1
0,6180	5,39-3	3,33-3	1,25-1	1,39-1	1,65-1
0,5299	8,63-1	4,57-1	1,73+1	1,92+1	2,32+1
0,5105	1,81-2	9,24-3	3,49-1	3,88-1	4,70-1
0,4229	3,09-3	1,31-3	4,91-2	5,46-2	7,00-2
0,4176	1,53-3	6,39-4	2,40-2	2,67-2	3,43-2
0,2627	3,56-3	9,35-4	3,35-2	3,72-2	5,21-2
	1,03+0	6,02-1	2,24+1	2,49+1	2,96+1
$^{137}\text{Xe} \rightarrow ^{137}\text{I}$; 36,4 сут					
0,3750	1,72-1	6,45-2	2,41+0	2,68+0	3,53+0
0,2028	6,83-1	1,38-1	4,73+0	5,26+0	7,68+0
0,1721	2,55-1	4,39-2	1,44+0	1,60+0	2,44+0
0,1452	4,29-2	6,23-3	1,97-1	2,18-1	3,51-1
0,0576	1,33-2	7,66-4	3,14-2	3,27-2	7,94-2
KX 0,03306	2,84-2	9,39-4	1,37-1	1,39-1	3,11-1
KX 0,03229	8,85-2	2,86-3	4,45-1	4,51-1	1,01+0
KX 0,03224	4,57-2	1,47-3	2,30-1	2,33-1	5,22-1
	1,33+0	2,59-1 (2,80-1)	9,62+0	1,06+1	1,60+1
$^{134}\text{mXe} \rightarrow ^{134}\text{Xe}$; 11,97 сут					
0,1639	1,91-2	3,13-3	1,02-1	1,13-1	1,74-1
KX 0,03443	1,84-2	6,34-4	8,24-2	8,35-2	1,88-1
KX 0,03388	6,28-4	2,13-5	2,90-3	2,93-3	6,61-3
KX 0,03362	5,51-2	1,85-3	2,58-1	2,61-1	5,87-1
KX 0,03356	2,83-2	9,50-4	1,33-1	1,34-1	3,02-1
	1,22-1	6,59-3 (2,00-2)	5,77-1	5,95-1	1,26+0

Продолжение табл. 2.2

E_{0i} , МэВ	Квантовый выход на распад $\lambda_i, \Sigma \lambda_i$, фотон/расп.	$E_{0i} \lambda_i$, $\Sigma E_{0i} \lambda_i$, МэВ/расп.	$\Gamma_{Ki}, \Gamma_{K=}$ $= \Sigma \Gamma_{Ki}$ аГр·м ² /(с·Бк)	$\Gamma_{Hi}, \Gamma_{H=}$ $= \Sigma \Gamma_{Hi}$ азВ·м ² /(с·Бк)	$\Gamma_{H, макс. i}$ $\Gamma_{H, макс.} =$ $= \Sigma \Gamma_{H, макс. i}$ азВ·м ² /(с·Бк)
$^{133}_{54}\text{Xe} \rightarrow ^{133}_{54}\text{Xe}; 2,188$ сут					
0,2332	9,99—2	2,33—2	8,16—1	9,06—1	1,30+0
KX 0,03443	1,91—2	6,58—4	8,56—2	8,67—2	1,96—1
KX 0,03362	5,72—2	1,92—3	2,68—1	2,71—1	6,10—1
KX 0,03356	2,94—2	9,87—4	1,38—1	1,40—1	3,14—1
	2,06—1	2,69—2 (4,07—2)	1,31+0	1,40+0	2,42+0
$^{133}_{54}\text{Xe} \rightarrow ^{133}_{55}\text{Cs}; 5,247$ сут					
0,1606	6,20—4	9,96—5	3,21—3	3,57—3	5,55—3
0,08100	3,74—1	3,03—2	9,22—1	9,95—1	2,16—1
0,07962	2,11—3	1,68—4	5,14—3	5,54—3	1,22—2
KX 0,03584	1,70—2	6,09—4	7,08—2	7,18—2	1,63—1
KX 0,03499	4,89—2	1,71—3	2,13—1	2,16—1	4,88—1
KX 0,03492	2,52—2	8,80—4	1,10—1	1,12—1	2,52—1
KX 0,03097	2,53—1	7,84—3	1,37+0	1,39+0	3,09+0
KX 0,03063	1,37—1	4,20—3	7,58—1	7,67—1	1,70+0
	8,58—1	4,58—2 (4,60—2)	3,45+0	3,56+0	7,88+0
$^{135}_{54}\text{Xe} \rightarrow ^{135}_{54}\text{Xe} (1,0), ^{135}_{55}\text{Cs} (4,00—5); 15,65$ мин					
0,5266	8,07—1	4,25—1	1,60+1	1,78+1	2,15+1
KX 0,03362	1,40—2	4,71—4	6,55—2	6,63—2	1,49—1
	8,21—1	4,25—1 (4,29—1)	1,61+1	1,79+1	2,16+1
$^{135}_{54}\text{Xe} \rightarrow ^{135}_{55}\text{Cs}; 9,10$ ч					
0,8126	7,03—4	5,71—4	2,10—2	2,32—2	2,64—2
0,7315	5,50—4	4,02—4	1,50—2	1,66—2	1,91—2
0,6544	4,51—4	2,95—4	1,11—2	1,23—2	1,44—2
0,6082	2,90—2	1,76—2	6,64—1	7,37—1	8,80—1
0,4080	3,59—3	1,46—3	5,50—2	6,12—2	7,92—2
0,3584	2,21—3	7,92—4	2,94—2	3,27—2	4,56—2
0,2498	9,01—1	2,25—1	7,98+0	8,86+0	1,25+1
0,1582	2,89—3	4,57—4	1,47—2	1,63—2	2,55—2
KX 0,03097	2,70—2	8,36—4	1,46—1	1,48—1	3,30—1
KX 0,03063	1,46—2	4,47—4	8,07—2	8,17—2	1,82—1
	9,82—1	2,48—1	9,02+0	9,99+0	1,41+1

Продолжение табл. 2.2

E_{0i} , МэВ	Квантовый выход на распад $\lambda_i, \Sigma \lambda_i$, фотон/расп.	$E_{0i} \lambda_i$, $\Sigma E_{0i} \lambda_i$, МэВ/расп.	$\Gamma_{Ki}, \Gamma_{K=}$ $= \Sigma \Gamma_{Ki}$ аГр·м ² /(с·Бк)	$\Gamma_{Hi}, \Gamma_{H=}$ $= \Sigma \Gamma_{Hi}$ азВ·м ² /(с·Бк)	$\Gamma_{H, макс. i}$ $\Gamma_{H, макс.} =$ $= \Sigma \Gamma_{H, макс. i}$ азВ·м ² /(с·Бк)
$^{132}_{55}\text{Cs} \rightarrow ^{132}_{54}\text{Xe} (0,980), ^{132}_{56}\text{Ba} (0,020); 6,479$ сут					
1,985	7,02—4	1,39—3	4,17—2	4,63—2	4,95—2
1,318	5,85—3	7,71—3	2,57—1	2,86—1	3,11—1
1,297	5,65—4	7,33—4	2,46—2	2,73—2	2,97—2
1,136	5,07—3	5,76—3	1,99—1	2,21—1	2,43—1
0,6677	9,75—1	6,51—1	2,44+1	2,71+1	3,17+1
0,6302	1,01—2	6,36—3	2,39—1	2,66—1	3,14—1
0,5059	7,99—3	4,04—3	1,53—1	1,70—1	2,06—1
0,511 ±	6,00—3	3,07—3	1,16—1	1,29—1	1,56—1
KX 0,03443	2,50—2	8,61—4	1,12—1	1,14—1	2,56—1
KX 0,03362	7,50—2	2,52—3	3,51—1	3,55—1	7,99—1
KX 0,03356	3,86—2	1,30—3	1,81—1	1,83—1	4,12—1
	1,15+0	6,85—1 (7,02—1)	2,61+1	2,89+1	3,45+1
$^{134}_{55}\text{Cs} \rightarrow ^{134}_{54}\text{Xe} (3,00—6), ^{134}_{56}\text{Ba} (1,0); 2,062$ года					
1,365	3,04—2	4,15—2	1,37+0	1,53+0	1,66+0
1,168	1,80—2	2,10—2	7,22—1	8,02—1	8,79—1
1,039	1,00—2	1,04—2	3,67—1	4,07—1	4,49—1
0,8019	8,73—2	7,00—2	2,57+0	2,85+0	3,25+0
0,7958	8,54—1	6,80—1	2,50+1	2,77+1	3,16+1
0,6047	9,76—1	5,93—1	2,22+1	2,47+1	2,95+1
0,5693	1,54—1	8,77—2	3,31+0	3,67+0	4,41+0
0,5632	8,38—2	4,72—2	1,78+0	1,98+0	2,38+0
0,4753	1,46—2	6,94—3	2,62—1	2,91—1	3,59—1
	2,23+0	1,56+0	5,76+1	6,39+1	7,45+1
$^{136}_{55}\text{Cs} \rightarrow ^{136}_{56}\text{Ba}; 13,16$ сут					
1,235	1,98—1	2,44—1	8,29+0	9,21+0	1,00+1
1,048	7,97—1	8,35—1	2,94+1	3,26+1	3,60+1
0,8185	9,97—1	8,16—1	2,99+1	3,32+1	3,77+1
0,5072	9,79—3	4,96—3	1,88—1	2,08—1	2,53—1
0,3406	4,68—1	1,59—1	5,90+0	6,56+0	8,81+0
0,2736	1,27—1	3,48—2	1,25+0	1,39+0	1,94+0
0,1766	1,36—1	2,40—2	7,93—1	8,81—1	1,34+0
0,1639	4,62—2	7,57—3	2,46—1	2,73—1	4,22—1
0,1532	7,47—2	1,14—2	3,65—1	4,05—1	6,39—1
0,08629	6,31—2	5,44—3	1,64—1	1,78—1	3,72—1
0,06691	1,25—1	8,36—3	2,89—1	3,06—1	7,18—1

Продолжение табл. 2.2

E_{0i} , МэВ	Квантовый выход на распад λ_i , $\Sigma \lambda_i$, фотон/расп.	$E_{0i} \lambda_i$, $\Sigma E_{0i} \lambda_i$, МэВ/расп.	$\Gamma_{Ki}, \Gamma_K =$ $= \Sigma \Gamma_{Ki}$ аГр·м ² /(с·Бк)	$\Gamma_{Hi}, \Gamma_H =$ $= \Sigma \Gamma_{Hi}$ азв·м ² /(с·Бк)	$\Gamma_{H, макс. i}$ $\Gamma_{H, макс} =$ $= \Sigma \Gamma_{H, макс. i}$ азв·м ² /(с·Бк)
КХ 0,03219	9,58-2	3,08-3	4,84-1	4,91-1	1,10+0
	3,14+0	2,16+0	7,73+1	8,57+1	9,94+1
$^{137}_{56}\text{Cs} + ^{137}_{56}\text{mBa} \rightarrow ^{137}_{56}\text{Ba}$; 30,0 лет (2,552 мин)					
0,6616	8,50-1	5,62-1	2,11+1	2,34+1	2,74+1
КХ 0,03219	3,71-2	1,19-3	1,88-1	1,90-1	4,25-1
КХ 0,03182	2,01-2	6,40-4	1,04-1	1,05-1	2,35-1
	9,07-1	5,64-1	2,14+1	2,37+1	2,81+1
$^{131}_{56}\text{Ba} \rightarrow ^{131}_{55}\text{Cs}$; 11,55 сут					
1,048	1,19-2	1,25-2	4,39-1	4,88-1	5,38-1
1,047	1,99-3	2,08-3	7,34-2	8,15-2	8,99-2
0,9239	6,96-3	6,43-3	2,32-1	2,58-1	2,88-1
0,8316	2,19-3	1,82-3	6,66-2	7,39-2	8,38-2
0,6965	1,47-3	1,02-3	3,83-2	4,26-2	4,93-2
0,6744	1,29-3	8,70-4	3,26-2	3,62-2	4,23-2
0,6200	1,57-2	9,73-3	3,66-1	4,07-1	4,83-1
0,5850	1,23-2	7,20-3	2,71-1	3,01-1	3,61-1
0,5727	1,59-3	9,11-4	3,43-2	3,81-2	4,58-2
0,4963	4,38-1	2,17-1	8,22+0	9,13+0	1,11+1
0,4865	1,89-2	9,20-3	3,47-1	3,86-1	4,72-1
0,4804	3,38-3	1,62-3	6,13-2	6,81-2	8,37-2
0,4040	1,29-2	5,21-3	1,96-1	2,18-1	2,83-1
0,3732	1,33-1	4,96-2	1,85+0	2,06+0	2,72+0
0,2945	1,59-3	4,68-4	1,71-2	1,90-2	2,62-2
0,2494	2,81-2	7,01-3	2,48-1	2,76-1	3,90-1
0,2469	5,97-3	1,47-3	5,22-2	5,79-2	8,20-2
0,2396	2,41-2	5,77-3	2,03-1	2,26-1	3,21-1
0,2161	1,99-1	4,30-2	1,48+0	1,65+0	2,39+0
0,1336	2,19-2	2,93-3	9,10-2	1,01-1	1,69-1
0,1238	2,91-1	3,60-2	1,11+0	1,22+0	2,12+0
0,09230	6,37-3	5,88-4	1,76-2	1,92-2	3,84-2
0,07875	7,54-3	5,94-4	1,83-2	1,97-2	4,34-2
КХ 0,03584	3,43-2	1,23-3	1,43-1	1,45-1	3,29-1
КХ 0,03499	9,89-2	3,46-3	4,30-1	4,36-1	9,86-1
КХ 0,03492	5,10-2	1,78-3	2,23-1	2,26-1	5,10-1
КХ 0,03097	5,12-1	1,59-2	2,78+0	2,81+0	2,65+0
КХ 0,03063	2,77-1	8,48-3	1,53+0	1,55+0	3,44+0
	2,22+0	4,54-1	2,05+1	2,24+1	3,38+1

Продолжение табл. 2.2

E_{0i} , МэВ	Квантовый выход на распад λ_i , $\Sigma \lambda_i$, фотон/расп.	$E_{0i} \lambda_i$, $\Sigma E_{0i} \lambda_i$, МэВ/расп.	$\Gamma_{Ki}, \Gamma_K =$ $= \Sigma \Gamma_{Ki}$ аГр·м ² /(с·Бк)	$\Gamma_{Hi}, \Gamma_H =$ $= \Sigma \Gamma_{Hi}$ азв·м ² /(с·Бк)	$\Gamma_{H, макс. i}$ $\Gamma_{H, макс} =$ $= \Sigma \Gamma_{H, макс. i}$ азв·м ² /(с·Бк)
$^{133}_{56}\text{Ba} \rightarrow ^{133}_{55}\text{Cs}$; 10,535 года					
0,3839	8,91-2	3,42-2	1,28+0	1,42+0	1,87+0
0,3560	6,21-1	2,21-1	8,22+0	9,13+0	1,22+0
0,3029	1,84-1	5,57-2	2,04+0	2,27+0	3,11+0
0,2764	7,09-2	1,96-2	7,08-1	7,86-1	1,09+0
0,2232	4,60-3	1,03-3	3,57-2	3,96-2	5,70-2
0,1606	6,15-3	9,88-4	3,19-2	3,54-2	5,51-2
0,08100	3,38-1	2,74-2	8,34-1	8,99-1	1,95+0
0,07962	2,56-2	2,04-3	6,24-2	6,72-2	1,47-1
0,05315	2,17-2	1,15-3	5,39-2	5,56-2	1,35-1
КХ 0,03584	4,23-2	1,52-3	1,76-1	1,79-1	4,05-1
КХ 0,03499	1,22-1	4,27-3	5,31-1	5,38-1	1,22+0
КХ 0,03492	6,28-2	2,19-3	2,74-1	2,78-1	6,28-1
КХ 0,03097	6,31-1	1,95-2	3,42+0	3,46+0	7,70+0
КХ 0,03063	3,41-1	1,04-2	1,88+0	1,91+0	4,24+0
	2,56+0	4,01-1	1,96+1	2,11+1	3,48+1
$^{140}_{56}\text{Ba} \rightarrow ^{140}_{57}\text{La}$; 12,746 сут					
0,5373	2,44-1	1,31-1	4,95+0	5,50+0	6,63+0
0,4676	1,47-3	6,87-4	2,59-2	2,88-2	3,57-2
0,4376	1,93-2	8,45-3	3,18-1	3,54-1	4,48-1
0,4237	3,15-2	1,34-2	5,02-1	5,58-1	7,14-1
0,3048	4,30-2	1,31-2	4,81-1	5,34-1	7,32-1
0,1626	6,21-2	1,01-2	3,27-1	3,63-1	5,63-1
0,1327	2,02-3	2,68-4	8,33-3	9,20-3	1,55-2
КХ 0,03344	1,01-2	3,38-4	4,77-2	4,83-2	1,09-1
	4,14-1	1,77-1	6,66+0	7,39+0	9,25+0
		(1,82-1)			
$^{140}_{57}\text{La} \rightarrow ^{140}_{58}\text{Ce}$; 40,280 ч					
2,547	1,04-3	2,65-3	7,33-2	8,12-2	8,65-2
2,521	3,43-2	8,65-2	2,40+0	2,66+0	2,83+0
2,348	8,46-3	1,99-2	5,64-1	6,25-1	6,67-1
1,596	9,54-1	1,52+0	4,85+1	5,39+1	5,80+1
0,9510	5,39-3	5,13-3	1,84-1	2,04-1	2,27-1
0,9252	7,05-2	6,52-2	2,35+0	2,61+0	2,92+0
0,9195	2,68-2	2,46-2	8,90-1	9,88-1	1,10+0
0,8678	5,59-2	4,85-2	1,76+0	1,96+0	2,21+0
0,8158	2,36-1	1,92-1	7,06+0	7,83+0	8,90+0

Продолжение табл. 2.2

E_{0i} , МэВ	Квантовый выход на распад $\lambda_i, \Sigma \lambda_i$, фотон/расп.	$E_{0i} \lambda_i$, $\Sigma E_{0i} \lambda_i$, МэВ/расп.	$\Gamma_{Ki} \Gamma_K =$ $\Sigma \Gamma_{Ki} \Gamma_K$ аГр·м ² /(с·Бк)	$\Gamma_{Hi} \Gamma_H =$ $\Sigma \Gamma_{Hi} \Gamma_H$ азв·м ² /(с·Бк)	$\Gamma_{H, макс, i}$ $\Gamma_{H, макс} =$ $\Sigma \Gamma_{H, макс, i}$ азв·м ² /(с·Бк)
0,7518	4,41—2	3,32—2	1,23+0	1,36+0	1,57+0
0,4870	4,59—1	2,24—1	8,44+0	9,38+0	1,15+1
0,4325	2,99—2	1,29—2	4,86—1	5,41—1	6,88—1
0,3288	2,07—1	6,81—2	2,51+0	2,79+0	3,77+0
	2,13+0	2,30+0	7,64+1	8,50+1	9,44+1
$^{139}\text{Ce} \rightarrow ^{139}\text{La}$; 137,66 сут					
0,1659	7,91—1	1,31—1	4,27+0	4,74+0	7,31+0
KX 0,03875	3,10—2	1,20—3	1,12—1	1,14—1	2,61—1
KX 0,03780	8,27—2	3,13—3	3,13—1	3,18—1	7,26—1
KX 0,03772	4,28—2	1,61—3	1,63—1	1,65—1	3,77—1
KX 0,03344	4,24—1	1,42—2	2,00+0	2,03+0	4,56+0
KX 0,03303	2,31—1	7,63—3	1,12+0	1,13+0	2,54+0
	1,60+0	1,59—1	7,97+0	8,49+0	1,58+1
$^{158}\text{Ce} \rightarrow ^{158}\text{Pr}$; 32,50 сут					
0,1454	4,80—1	6,98—2	2,20+0	2,44+0	3,93+0
KX 0,04179	7,02—3	2,93—4	2,27—2	2,31—2	5,37—2
KX 0,04075	1,75—2	7,13—4	5,85—2	5,94—2	1,37—1
KX 0,04065	9,01—3	3,66—4	3,02—2	3,06—2	7,09—2
KX 0,03603	8,83—2	3,18—3	3,64—1	3,70—1	8,39—1
KX 0,03555	4,84—2	1,72—3	2,05—1	2,08—1	4,70—1
	6,50—1	7,61—2	2,88+0	3,13+0	5,50+0
$^{144}\text{Ce} \rightarrow ^{144}\text{Pr}$ (0,0178), ^{144}Pr (0,9822); 285,8 сут					
0,1335	1,08—1	1,44—2	4,48—1	4,96—1	8,32—1
0,09995	3,96—4	3,96—5	1,17—3	1,28—3	2,47—3
0,09100	3,46—3	3,15—4	9,43—3	1,03—2	2,07—2
0,08650	3,46—3	2,99—4	9,03—3	9,80—3	2,04—2
0,08012	1,64—2	1,31—3	4,01—2	4,32—2	9,45—2
0,06600	5,40—4	3,56—5	1,25—3	1,32—3	3,11—3
0,05341	1,19—3	6,36—5	2,94—3	3,04—3	7,39—3
0,04093	4,86—3	1,99—4	1,62—2	1,64—2	3,80—2
0,03357	2,48—3	8,32—5	1,16—2	1,18—2	2,65—2
KX 0,04179	4,29—3	1,79—4	1,39—2	1,41—2	3,28—2
KX 0,04075	1,07—2	4,36—4	3,58—2	3,63—2	8,40—2
KX 0,04065	5,51—3	2,24—4	1,85—2	1,88—2	4,33—2
KX 0,03603	5,40—2	1,95—3	2,23—1	2,26—1	5,13—1

Продолжение табл. 2.2

E_{0i} , МэВ	Квантовый выход на распад $\lambda_i, \Sigma \lambda_i$, фотон/расп.	$E_{0i} \lambda_i$, $\Sigma E_{0i} \lambda_i$, МэВ/расп.	$\Gamma_{Ki} \Gamma_K =$ $\Sigma \Gamma_{Ki} \Gamma_K$ аГр·м ² /(с·Бк)	$\Gamma_{Hi} \Gamma_H =$ $\Sigma \Gamma_{Hi} \Gamma_H$ азв·м ² /(с·Бк)	$\Gamma_{H, макс, i}$ $\Gamma_{H, макс} =$ $\Sigma \Gamma_{H, макс, i}$ азв·м ² /(с·Бк)
KX 0,03555	2,96—2	1,05—3	1,25—1	1,27—1	2,88—1
	2,45—1	2,06—2 (2,07—2)	9,56—1	1,02+0	2,01+0
$^{144}\text{mPr} \rightarrow ^{144}\text{Pr}$ (0,999), ^{144}Nd (0,001); 7,2 мин					
0,8141	6,00—4	4,88—4	1,79—2	1,99—2	2,26—2
0,6965	6,00—4	4,18—4	1,56—2	1,74—2	2,01—2
0,05903	7,90—4	4,66—5	1,84—3	1,92—3	4,66—3
KX 0,04179	1,25—2	5,22—4	4,04—2	4,11—2	9,57—2
KX 0,04105	4,49—4	1,84—5	1,49—3	1,51—3	3,50—3
KX 0,04075	3,12—2	1,27—3	1,04—1	1,06—1	2,45—1
KX 0,04065	1,61—2	6,54—4	5,40—2	5,48—2	1,27—1
KX 0,03603	1,57—1	5,66—3	6,48—1	6,57—1	1,49+0
KX 0,03555	8,62—2	3,06—3	3,64—1	3,70—1	8,37—1
	3,05—1	1,21—2 (1,27—2)	1,25+0	1,27+0	2,85+0
$^{159}\text{Pr} \rightarrow ^{159}\text{Nd}$; 17,28 мин					
2,186	7,74—3	1,69—2	4,91—1	5,45—1	5,82—1
1,489	3,00—3	4,47—3	1,45—1	1,61—1	1,74—1
1,388	6,59—5	9,15—5	3,02—3	3,36—3	3,63—3
0,6965	1,48—2	1,03—2	3,86—1	4,29—1	4,97—1
	2,56—2	3,18—2	1,03+0	1,14+0	1,26+0
$^{147}\text{Pm} \rightarrow ^{147}\text{Sm}$; 2,623 года					
0,1212	2,85—5	3,45—6	1,06—4	1,16—4	2,05—4
KX 0,04661	9,69—7	4,52—8	2,73—6	2,79—6	6,67—6
KX 0,04541	2,21—6	1,00—7	6,44—6	6,56—6	1,56—5
KX 0,04529	1,14—6	5,16—8	3,33—6	3,40—6	8,06—6
KX 0,04012	1,13—5	4,53—7	3,85—5	3,91—5	9,00—5
KX 0,03952	6,22—6	2,46—7	2,17—5	2,21—5	5,07—5
	5,03—5	4,35—6 (4,37—6)	1,78—4	1,90—4	3,76—4
$^{148}\text{Pm} \rightarrow ^{148}\text{Sm}$; 5,37 сут					
1,465	2,22—1	3,25—1	1,06+1	1,18+1	1,27+1
0,9149	1,25—1	1,14—1	4,13+0	4,59+0	5,13+0
0,6111	1,12—2	6,84—3	2,58—1	2,86—1	3,41—1

Продолжение табл. 2.2

E_{0i} , МэВ	Квантовый выход на распад $\lambda_i, \Sigma \lambda_i$, фотон/расп.	$E_{0i} \lambda_i$, $\Sigma E_{0i} \lambda_i$, МэВ/расп.	$\Gamma_{K\beta} \Gamma_K =$ $= \Sigma \Gamma_{K\beta} \Gamma_K$ $\text{аГр} \cdot \text{м}^2 / (\text{с} \cdot \text{Бк})$	$\Gamma_{H\beta} \Gamma_H =$ $= \Sigma \Gamma_{H\beta} \Gamma_H$ $\text{аЗв} \cdot \text{м}^2 / (\text{с} \cdot \text{Бк})$	$\Gamma_{H, \text{макс}, i}$ $\Gamma_{H, \text{макс}} =$ $= \Sigma \Gamma_{H, \text{макс}, i}$ $\text{аЗв} \cdot \text{м}^2 / (\text{с} \cdot \text{Бк})$
0,5501	2,33—1	1,28—1	4,84+0	5,37+0	6,47+0
	5,91—1	5,74—1	1,98+1	2,20+1	2,46+1
$^{152}_{63}\text{Eu} \rightarrow ^{152}_{64}\text{Gd}$ (0,2792), $^{152}_{62}\text{Sm}$ (0,7208); 13,2 года					
1,528	2,65—3	4,06—3	1,31—1	1,46—1	1,57—1
1,458	4,94—3	7,20—3	2,35—1	2,61—1	2,82—1
1,408	2,09—1	2,94—1	9,68+0	1,08+1	1,16+1
1,299	1,63—2	2,12—2	7,09—1	7,89—1	8,58—1
1,293	1,02—3	1,32—3	4,42—2	4,92—2	5,35—2
1,250	1,84—3	2,30—3	7,77—2	8,64—2	9,42—2
1,213	1,40—2	1,70—2	5,78—1	6,42—1	7,02—1
1,112	1,36—1	1,51—1	5,25+0	5,83+0	6,41+0
1,109	1,83—3	2,03—3	7,05—2	7,83—2	8,61—2
1,090	1,66—2	1,81—2	6,31—1	7,01—1	7,72—1
1,086	1,02—1	1,11—1	3,87+0	4,30+0	4,73+0
1,084	2,36—3	2,56—3	8,94—2	9,92—2	1,09—1
1,005	6,49—3	6,52—3	2,32—1	2,57—1	2,85—1
0,9641	1,34—3	1,29—3	4,63—2	5,14—2	5,71—2
0,9641	1,45—1	1,40—1	5,01+0	5,56+0	6,18+0
0,9263	2,65—3	2,46—3	8,85—2	9,82—2	1,10—1
0,9194	4,36—3	4,01—3	1,45—1	1,61—1	1,80—1
0,8674	4,21—2	3,65—2	1,33+0	1,48+0	1,66+0
0,8416	1,63—3	1,37—3	5,01—2	5,56—2	6,29—2
0,8105	3,17—3	2,57—3	9,43—2	1,04—1	1,19—1
0,7789	1,30—1	1,01—1	3,74+0	4,14+0	4,74+0
0,7649	1,75—3	1,34—3	4,95—2	5,49—2	6,30—2
0,7194	2,67—3	1,92—3	7,16—2	7,95—2	9,18—2
0,6786	4,71—3	3,20—3	1,20—1	1,33—1	1,55—1
0,6747	1,86—3	1,26—3	4,70—2	5,22—2	6,10—2
0,5640	4,67—3	2,63—3	9,93—2	1,10—1	1,33—1
0,4887	4,07—3	1,99—3	7,51—2	8,35—2	1,02—1
0,4440	2,80—2	1,24—2	4,68—1	5,20—1	6,56—1
0,4440	3,19—3	1,42—3	5,33—2	5,93—2	7,48—2
0,4111	2,23—2	9,17—3	3,44—1	3,83—1	4,95—1
0,3678	8,63—3	3,17—3	1,18—1	1,32—1	1,74—1
0,3443	2,66—1	9,16—2	3,39+0	3,77+0	5,05+0
0,2959	4,30—3	1,27—3	4,65—2	5,16—2	7,11—2
0,2447	7,51—2	1,84—2	6,49—1	7,21—1	1,02+0
0,1218	2,84—1	3,46—2	1,06+0	1,17+0	2,05+0
KX 0,04661	3,30—2	1,54—3	9,30—2	9,50—2	2,27—1

Продолжение табл. 2.2

E_{0i} , МэВ	Квантовый выход на распад $\lambda_i, \Sigma \lambda_i$, фотон/расп.	$E_{0i} \lambda_i$, $\Sigma E_{0i} \lambda_i$, МэВ/расп.	$\Gamma_{K\beta} \Gamma_K =$ $= \Sigma \Gamma_{K\beta} \Gamma_K$ $\text{аГр} \cdot \text{м}^2 / (\text{с} \cdot \text{Бк})$	$\Gamma_{H\beta} \Gamma_H =$ $= \Sigma \Gamma_{H\beta} \Gamma_H$ $\text{аЗв} \cdot \text{м}^2 / (\text{с} \cdot \text{Бк})$	$\Gamma_{H, \text{макс}, i}$ $\Gamma_{H, \text{макс}} =$ $= \Sigma \Gamma_{H, \text{макс}, i}$ $\text{аЗв} \cdot \text{м}^2 / (\text{с} \cdot \text{Бк})$
KX 0,04541	7,52—2	3,42—3	2,19—1	2,23—1	5,31—1
KX 0,04529	3,88—2	1,76—3	1,13—1	1,16—1	2,74—1
KX 0,04012	3,84—1	1,54—2	1,31+0	1,33+0	3,06+0
KX 0,03952	2,12—1	8,38—3	7,41—1	7,52—1	1,73+0
	2,30+0	1,14+0	4,12+1	4,55+1	5,53+1
$^{154}_{63}\text{Eu} \rightarrow ^{154}_{62}\text{Sm}$ (0,0002), $^{154}_{64}\text{Gd}$ (0,9998); 8,8 года					
1,597	1,83—2	2,92—2	9,30—1	1,04+0	1,11+0
1,593	1,03—2	1,64—2	5,23—1	5,81—1	6,25—1
1,494	6,50—3	9,71—3	3,15—1	3,51—1	3,78—1
1,274	3,55—1	4,52—1	1,52+1	1,69+1	1,84+1
1,246	8,98—3	1,12—2	3,78—1	4,21—1	4,59—1
1,242	1,31—3	1,63—3	5,51—2	6,12—2	6,68—2
1,141	2,17—3	2,48—3	8,55—2	9,50—2	1,04—1
1,128	2,66—3	3,00—3	1,04—1	1,15—1	1,27—1
1,047	1,42—3	1,49—3	5,24—2	5,81—2	6,42—2
1,005	1,79—1	1,80—1	6,40+0	7,10+0	7,86+0
0,9963	1,03—1	1,03—1	3,66+0	4,06+0	4,49+0
0,9040	8,23—3	7,44—3	2,69—1	2,99—1	3,35—1
0,8927	4,61—3	4,12—3	1,49—1	1,66—1	1,86—1
0,8732	1,15—1	1,00—1	3,65+0	4,05+0	4,56+0
0,8506	2,31—3	1,96—3	7,17—2	7,95—2	8,98—2
0,8454	5,50—3	4,65—3	1,70—1	1,88—1	2,13—1
0,8155	4,65—3	3,79—3	1,39—1	1,54—1	1,75—1
0,7569	4,33—2	3,28—2	1,21+0	1,35+0	1,55+0
0,7233	1,97—1	1,42—1	5,31+0	5,90+0	6,80+0
0,7158	1,74—3	1,24—3	4,65—2	5,16—2	5,96—2
0,6252	3,09—3	1,93—3	7,26—2	8,07—2	9,57—2
0,5918	4,83—2	2,86—2	1,08+0	1,20+0	1,43+0
0,5820	8,41—3	4,90—3	1,84—1	2,05—1	2,46—1
0,5576	2,56—3	1,43—3	5,38—2	5,98—2	7,20—2
0,4444	5,04—3	2,24—3	8,43—2	9,38—2	1,18—2
0,2479	6,60—2	1,64—2	5,79—1	6,43—1	9,11—1
0,1231	4,05—1	4,99—2	1,53+0	1,68+0	2,94+0
KX 0,04870	2,72—2	1,32—3	7,26—2	7,42—2	1,79—1
KX 0,04300	1,42—1	6,11—3	4,43—1	4,51—1	1,06+0
KX 0,04231	7,87—2	3,33—3	2,51—1	2,55—1	5,95—1
	1,86+0	1,22+0	4,31+1	4,78+1	5,53+1

Продолжение табл. 2.2

E_{0i} , МэВ	Квантовый выход на распад $n_i, \Sigma n_i$, фотон/расп.	$E_{0i} n_i$, $\Sigma E_{0i} n_i$, МэВ/расп.	$\Gamma_{K\Gamma} \Gamma_K =$ $= \Sigma \Gamma_{K\Gamma}$ аГр·м ² /(с·Бк)	$\Gamma_{H\Gamma} \Gamma_H =$ $= \Sigma \Gamma_{H\Gamma}$ азв·м ² /(с·Бк)	$\Gamma_{H, макс, i}$ $\Gamma_{H, макс} =$ $= \Sigma \Gamma_{H, макс, i}$ азв·м ² /(с·Бк)
$^{155}_{63}\text{Eu} \rightarrow ^{155}_{64}\text{Gd}$; 4,68 года					
0,1461	5,28-4	7,71-5	2,44-3	2,70-3	4,34-3
0,1053	2,06-1	2,17-2	6,48-1	7,10-1	1,34+0
0,08654	3,09-1	2,67-2	8,07-1	8,75-1	1,82+0
0,08606	1,51-3	1,30-4	3,92-3	4,26-3	8,88-3
0,06001	1,14-2	6,84-4	2,62-2	2,75-2	6,67-2
0,04530	1,28-2	5,80-4	3,74-2	3,81-2	9,05-2
KX 0,05000	1,06-2	5,30-4	2,74-2	2,80-2	6,80-2
KX 0,04870	2,28-2	1,11-3	6,08-2	6,22-2	1,50-1
KX 0,04855	1,18-2	5,73-4	3,16-2	3,23-2	7,80-2
KX 0,04300	1,19-1	5,12-3	3,72-1	3,78-1	8,86-1
KX 0,04231	6,59-2	2,79-3	2,10-1	2,14-1	4,98-1
	7,71-1	6,00-2 (6,05-2)	2,23+0	2,37+0	5,01+0
$^{156}_{63}\text{Eu} \rightarrow ^{156}_{64}\text{Gd}$; 15,19 сут					
2,301	9,48-4	2,18-3	6,23-2	6,91-2	7,37-2
2,270	1,10-2	2,50-2	7,16-1	7,94-1	8,48-1
2,212	9,49-4	2,10-3	6,07-2	6,74-2	7,19-2
2,205	9,79-3	2,16-2	6,25-1	6,93-1	7,40-1
2,187	3,87-2	8,46-2	2,46+0	2,73+0	2,91+0
2,181	2,38-2	5,19-2	1,51+0	1,67+0	1,79+0
2,116	1,23-3	2,60-3	7,63-2	8,47-2	9,05-2
2,111	8,36-4	1,76-3	5,18-2	5,75-2	6,14-2
2,098	4,19-2	8,79-2	2,58+0	2,87+0	3,07+0
2,033	1,27-3	2,58-3	7,67-2	8,51-2	9,10-2
2,027	3,46-2	7,01-2	2,08+0	2,32+0	2,48+0
1,966	4,12-2	8,10-2	2,43+0	2,70+0	2,89+0
1,946	1,86-3	3,62-3	1,09-1	1,21-1	1,29-1
1,938	2,10-2	4,07-2	1,23+0	1,36+0	1,46+0
1,877	1,69-2	3,17-2	9,64-1	1,07+0	1,15+0
1,857	2,50-3	4,64-3	1,42-1	1,57-1	1,68-1
1,682	2,96-3	4,98-3	1,56-1	1,74-1	1,86-1
1,366	1,72-2	2,35-2	7,78-1	8,65-1	9,38-1
1,277	3,15-2	4,02-2	1,35+0	1,50+0	1,64+0
1,242	6,62-2	8,22-2	2,78+0	3,09+0	3,38+0
1,231	8,77-2	1,08-1	3,66+0	4,07+0	4,44+0
1,169	2,87-3	3,36-3	1,15-1	1,28-1	1,40-1

Продолжение табл. 2.2

E_{0i} , МэВ	Квантовый выход на распад $n_i, \Sigma n_i$, фотон/расп.	$E_{0i} n_i$, $\Sigma E_{0i} n_i$, МэВ/расп.	$\Gamma_{K\Gamma} \Gamma_K =$ $= \Sigma \Gamma_{K\Gamma}$ аГр·м ² /(с·Бк)	$\Gamma_{H\Gamma} \Gamma_H =$ $= \Sigma \Gamma_{H\Gamma}$ азв·м ² /(с·Бк)	$\Gamma_{H, макс, i}$ $\Gamma_{H, макс} =$ $= \Sigma \Gamma_{H, макс, i}$ азв·м ² /(с·Бк)
1,156	1,37-3	1,58-3	5,45-2	6,06-2	6,64-2
1,154	5,19-2	5,99-2	2,06+0	2,29+0	2,51+0
1,153	7,03-2	8,11-2	2,79+0	3,10+0	3,40+0
1,141	2,90-3	3,31-3	1,14-1	1,27-1	1,39-1
1,129	1,39-3	1,57-3	5,43-2	6,03-2	6,62-2
1,079	4,78-2	5,16-2	1,80+0	2,00+0	2,21+0
1,076	3,66-3	3,94-3	1,38-1	1,53-1	1,69-1
1,065	5,14-2	5,47-2	1,92+0	2,13+0	2,35+0
1,049	4,02-3	4,22-3	1,48-1	1,65-1	1,82-1
1,040	5,24-3	5,45-3	1,92-1	2,13-1	2,36-1
1,012	3,34-3	3,38-3	1,20-1	1,33-1	1,47-1
0,9698	3,75-3	3,64-3	1,30-1	1,44-1	1,60-1
0,9610	1,53-3	1,47-3	5,27-2	5,85-2	6,50-2
0,9605	1,60-2	1,54-2	5,51-1	6,11-1	6,80-1
0,9475	3,05-3	2,89-3	1,04-1	1,15-1	1,28-1
0,9443	1,37-2	1,29-2	4,65-1	5,16-1	5,75-1
0,9070	3,88-3	3,52-3	1,27-1	1,41-1	1,58-1
0,8670	1,37-2	1,19-2	4,32-1	4,80-1	5,40-1
0,8412	2,20-3	1,85-3	6,76-2	7,50-2	8,49-2
0,8118	1,02-1	8,28-2	3,04+0	3,37+0	3,83+0
0,7235	5,90-2	4,27-2	1,59+0	1,77+0	2,04+0
0,7099	8,97-3	6,37-3	2,38-1	2,64-1	3,05-1
0,6463	6,96-2	4,50-2	1,69+0	1,88+0	2,21+0
0,5995	2,27-2	1,36-2	5,13-1	5,69-1	6,81-1
0,1992	7,75-3	1,54-3	5,25-2	5,84-2	8,55-2
0,08896	8,87-2	7,89-3	2,37-1	2,58-1	5,27-1
KX 0,04300	6,95-2	2,99-3	2,17-1	2,21-1	5,17-1
KX 0,04231	3,87-2	1,64-3	1,23-1	1,25-1	2,93-1
	1,22+0	1,30+0	4,30+1	4,78+1	5,31+1
$^{151}_{64}\text{Gd} \rightarrow ^{147}_{62}\text{Sm}$ (8,00-9), $^{151}_{63}\text{Eu}$ (1,0); 123,9 сут					
0,3535	1,03-3	3,64-4	1,35-2	1,50-2	2,00-2
0,3282	6,75-4	2,22-4	8,18-3	9,08-3	1,23-2
0,3074	8,42-3	2,59-3	9,51-2	1,06-1	1,44-1
0,2860	6,94-4	1,98-4	7,22-3	8,00-3	1,11-2
0,2604	4,28-4	1,12-4	3,98-3	4,42-3	6,21-3
0,2432	4,57-2	1,11-2	3,92-1	4,36-1	6,18-1
0,2390	1,18-3	2,82-4	9,92-3	1,10-2	1,57-2
0,1746	2,45-2	4,28-3	1,41-1	1,56-1	2,38-1
0,1536	5,11-2	7,85-3	2,50-1	2,78-1	4,38-1

Продолжение табл. 2.2

E_{0i} , МэВ	Квантовый выход на распад $\lambda_i, \Sigma \lambda_i$, фотон/расп.	$E_{0i} \lambda_i$, $\Sigma E_{0i} \lambda_i$, МэВ/расп.	$\Gamma_{Ki} \Gamma_{K'} =$ $\Sigma \Gamma_{Ki} \Gamma_{K'}$ аГр·м ² /(с·Бк)	$\Gamma_{Hi} \Gamma_{H'} =$ $\Sigma \Gamma_{Hi} \Gamma_{H'}$ аЗв·м ² /(с·Бк)	$\Gamma_{H, макс, i}$ $\Gamma_{H, макс} =$ $\Sigma \Gamma_{H, макс, i}$ аЗв·м ² /(с·Бк)
0,1065	6,56-4	6,99-5	2,09-3	2,29-3	4,29-3
KX 0,04828	3,69-2	1,78-3	9,95-2	1,02-1	2,45-1
KX 0,04704	8,17-2	3,84-3	2,28-1	2,32-1	5,57-1
KX 0,04691	4,21-2	1,98-3	1,18-1	1,20-1	2,88-1
KX 0,04154	4,21-1	1,75-2	1,37+0	1,40+0	3,24+0
KX 0,04090	2,33-1	9,53-3	7,75-1	7,87-1	1,82+0
	9,49-1	6,17-2 (6,37-2)	3,52+0	3,66+0	7,66+0
$^{153}\text{Gd} \rightarrow ^{153}\text{Eu}$; 241,6 сут					
0,1032	2,11-1	2,18-2	6,48-1	7,10-1	1,35+0
0,09743	2,95-1	2,87-2	8,54-1	9,33-1	1,82+0
0,08337	2,06-3	1,72-4	5,21-3	5,63-3	1,20-2
0,06967	2,42-2	1,69-3	5,61-2	5,97-2	1,38-1
KX 0,04828	5,49-2	2,65-3	1,48-1	1,51-1	3,65-1
KX 0,04704	1,22-1	5,74-3	3,40-1	3,47-1	8,32-1
KX 0,04691	6,27-2	2,94-3	1,75-1	1,79-1	4,28-1
KX 0,04154	6,27-1	2,60-2	2,04+0	2,08+0	4,83+0
KX 0,04090	3,47-1	1,42-2	1,15+0	1,17+0	2,71+0
	1,75+0	1,04-1 (1,05-1)	5,42+0	5,64+0	1,25+1
$^{169}\text{Yb} \rightarrow ^{169}\text{Tm}$; 32,022 сут					
0,3077	9,87-2	3,04-2	1,12+0	1,24+0	1,69+0
0,2611	1,68-2	4,39-3	1,57-1	1,74-1	2,44-1
0,1980	3,59-1	7,11-2	2,41+0	2,68+0	3,94+0
0,1772	2,23-1	3,95-2	1,31+0	1,45+0	2,20+0
0,1305	1,15-1	1,50-2	4,65-1	5,13-1	8,71-1
0,1182	1,91-2	2,26-3	6,88-2	7,57-2	1,35-1
0,1098	1,74-1	1,91-2	5,75-1	6,31-1	1,16+0
0,09361	2,55-2	2,39-3	7,12-2	7,77-2	1,55-1
0,06312	4,16-1	2,63-2	9,60-1	1,01+0	2,41+0
KX 0,05907	8,15-2	4,81-3	1,89-1	1,98-1	4,81-1
KX 0,05751	1,91-1	1,10-2	4,51-1	4,70-1	1,14+0
KX 0,05730	9,88-2	5,66-3	2,34-1	2,44-1	5,92-1
KX 0,05074	9,32-1	4,73-2	2,38+0	2,44+0	5,94+0
KX 0,04977	5,27-1	2,62-2	1,37+0	1,40+0	3,40+0
	3,28+0	3,05-1 (3,09-1)	1,18+1	1,26+1	2,44+1

Продолжение табл. 2.2.

E_{0i} , МэВ	Квантовый выход на распад $\lambda_i, \Sigma \lambda_i$, фотон/расп.	$E_{0i} \lambda_i$, $\Sigma E_{0i} \lambda_i$, МэВ/расп.	$\Gamma_{Ki} \Gamma_{K'} =$ $\Sigma \Gamma_{Ki} \Gamma_{K'}$ аГр·м ² /(с·Бк)	$\Gamma_{Hi} \Gamma_{H'} =$ $\Sigma \Gamma_{Hi} \Gamma_{H'}$ аЗв·м ² /(с·Бк)	$\Gamma_{H, макс, i}$ $\Gamma_{H, макс} =$ $\Sigma \Gamma_{H, макс, i}$ аЗв·м ² /(с·Бк)
$^{174}\text{Lu} \rightarrow ^{174}\text{Yb}$; 3,31 года					
1,318	7,98-4	1,05-3	3,51-2	3,90-2	4,24-2
1,242	5,99-2	7,44-2	2,52+0	2,80+0	3,05+0
0,511 ±	3,36-4	1,72-4	6,49-3	7,21-3	8,73-3
0,07648	5,37-2	4,11-3	1,29-1	1,38-1	3,08-1
KX 0,06101	3,60-2	2,20-3	8,29-2	8,70-2	2,10-1
KX 0,05938	8,56-2	5,08-3	1,98-1	2,07-1	5,03-1
KX 0,05916	4,43-2	2,62-3	1,03-1	1,08-1	2,61-1
KX 0,05239	4,14-1	2,17-2	1,04+0	1,07+0	2,60+0
KX 0,05135	2,35-1	1,21-2	5,96-1	6,12-1	1,49+0
	9,30-1	1,23-1 (1,26-1)	4,71+0	5,07+0	8,47+0
$^{175}\text{Hf} \rightarrow ^{175}\text{Lu}$; 70 сут					
0,4328	3,18-2	1,38-2	5,18-1	5,76-1	7,32-1
0,3536	2,27-3	8,03-4	2,98-2	3,31-2	4,42-2
0,3434	8,69-1	2,98-1	1,11+1	1,23+1	1,65+1
0,3189	1,74-3	5,55-4	2,04-2	2,27-2	3,08-2
0,2296	7,55-3	1,73-3	6,05-2	6,72-2	9,63-2
0,08936	2,35-2	2,10-3	6,31-2	6,86-2	1,40-1
KX 0,06298	3,89-2	2,45-3	8,97-2	9,45-2	2,26-1
KX 0,06129	9,48-2	5,81-3	2,18-1	2,29-1	5,53-1
KX 0,06105	4,91-2	3,00-3	1,13-1	1,19-1	2,86-1
KX 0,05407	4,53-1	2,45-2	1,11+0	1,15+0	2,79+0
KX 0,05297	2,58-1	1,37-2	6,42-1	6,62-1	1,61+0
	1,83+0	3,67-1 (3,68-1)	1,39+1	1,53+1	2,30+1
$^{181}\text{Hf} \rightarrow ^{181}\text{Ta}$; 42,38 сут					
0,6155	2,50-3	1,54-3	5,79-2	6,43-2	7,65-2
0,4820	8,60-1	4,14-1	1,56+1	1,74+1	2,14+1
0,4760	4,30-3	2,05-3	7,72-2	8,58-2	1,06-1
0,3458	1,40-1	4,84-2	1,80+0	1,99+0	2,67+0
0,1369	1,80-2	2,46-3	7,70-2	8,51-2	1,41-1
0,1362	6,10-2	8,31-3	2,59-1	2,87-1	4,77-1
0,1330	4,30-1	5,72-2	1,78+0	1,96+0	3,30+0
KX 0,06704	1,42-2	9,52-4	3,29-2	3,48-2	8,15-2
KX 0,06522	3,56-2	2,32-3	8,23-2	8,70-2	2,05-1
KX 0,06495	1,85-2	1,20-3	4,27-2	4,52-2	1,07-1

Продолжение табл. 2.2.

E_{0i} , МэВ	Квантовый выход на распад $\lambda_i, \Sigma \lambda_i$, фотон/расп.	$E_{0i} n_i$, $\Sigma E_{0i} n_i$, МэВ/расп.	$\Gamma_{Ki} \Gamma_{K=} = \Sigma \Gamma_{Ki}$ $\text{аГр} \cdot \text{м}^2 / (\text{с} \cdot \text{Бк})$	$\Gamma_{Hi} \Gamma_{H=} = \Sigma \Gamma_{Hi}$ $\text{азв} \cdot \text{м}^2 / (\text{с} \cdot \text{Бк})$	$\Gamma_{H, \text{макс}, i} = \Sigma \Gamma_{H, \text{макс}, i}$ $\text{азв} \cdot \text{м}^2 / (\text{с} \cdot \text{Бк})$
KX 0,05754	1,66-1	9,55-3	3,92-1	4,08-1	9,92-1
KX 0,05628	9,54-2	5,37-3	2,28-1	2,37-1	5,77-1
	1,84+0	5,54-1 (5,55-1)	2,05+1	2,27+1	3,01+1
$^{192}\text{Ir} \rightarrow ^{192}\text{Pt}$ (0,953), ^{192}Os (0,047); 73,83 сут					
0,8845	3,02-3	2,67-3	9,70-2	1,08-1	1,21-1
0,6125	5,33-2	3,26-2	1,23+0	1,36+0	1,62+0
0,6044	8,18-2	4,94-2	1,86+0	2,07+0	2,47+0
0,5886	4,52-2	2,66-2	1,00+0	1,11+0	1,33+0
0,4891	3,97-3	1,94-3	7,33-2	8,15-2	9,96-2
0,4846	3,16-2	1,53-2	5,78-1	6,43-1	7,88-1
0,4681	4,78-1	2,24-1	8,44+0	9,38+0	1,16+1
0,4165	6,62-3	2,76-3	1,04-1	1,15-1	1,48-1
0,3745	7,29-3	2,73-3	1,02-1	1,13-1	1,50-1
0,3165	8,28-1	2,62-1	9,65+0	1,07+1	1,46+1
0,3084	2,97-1	9,16-2	3,37+0	3,73+0	5,11+0
0,2960	2,90-1	8,58-2	3,14+0	3,48+0	4,80+0
0,2058	3,29-2	6,77-3	2,32-1	2,58-1	3,75-1
0,2013	4,66-3	9,38-4	3,20-2	3,56-2	5,20-2
KX 0,06683	4,58-2	3,06-3	1,06-1	1,12-1	2,63-1
KX 0,06512	2,67-2	1,74-3	6,17-2	6,52-2	1,54-1
KX 0,06300	2,18-2	1,37-3	5,03-2	5,30-2	1,26-1
	2,26+0	8,11-1	3,01+1	3,34+1	4,38+1
$^{198m}\text{Au} \rightarrow ^{198}\text{Au}$; 2,30 сут					
0,3338	1,54-1	5,14-2	1,90+0	2,11+0	2,84+0
0,2149	7,71-1	1,66-1	5,72+0	6,35+0	9,19+0
0,2041	5,03-1	1,03-1	3,51+0	3,90+0	5,69+0
0,1803	6,47-1	1,17-1	3,87+0	4,30+0	6,48+0
0,09721	6,89-1	6,70-2	1,99+0	2,18+0	4,25+0
KX 0,08022	4,40-2	3,53-3	1,08-1	1,16-1	2,54-1
KX 0,07798	1,07-1	8,34-3	2,59-1	2,78-1	6,15-1
KX 0,07758	5,57-2	4,32-3	1,34-1	1,44-1	3,20-1
KX 0,06881	4,71-1	3,24-2	1,09+0	1,16+0	2,69+0
KX 0,06699	2,76-1	1,85-2	6,39-1	6,77-1	1,58+0
	3,72+0	5,70-1 (5,76-1)	1,92+1	2,12+1	3,39+1

Продолжение табл. 2.2.

E_{0i} , МэВ	Квантовый выход на распад $\lambda_i, \Sigma \lambda_i$, фотон/расп.	$E_{0i} n_i$, $\Sigma E_{0i} n_i$, МэВ/расп.	$\Gamma_{Ki} \Gamma_{K=} = \Sigma \Gamma_{Ki}$ $\text{аГр} \cdot \text{м}^2 / (\text{с} \cdot \text{Бк})$	$\Gamma_{Hi} \Gamma_{H=} = \Sigma \Gamma_{Hi}$ $\text{азв} \cdot \text{м}^2 / (\text{с} \cdot \text{Бк})$	$\Gamma_{H, \text{макс}, i} = \Sigma \Gamma_{H, \text{макс}, i}$ $\text{азв} \cdot \text{м}^2 / (\text{с} \cdot \text{Бк})$
$^{198}\text{Au} \rightarrow ^{198}\text{Hg}$; 2,695 сут					
1,088	2,29-3	2,49-3	8,70-2	9,66-2	1,06-1
0,6759	1,06-2	7,16-3	2,68-1	2,98-1	3,48-1
0,4118	9,55-1	3,93-1	1,48+1	1,64+1	2,12+1
KX 0,07082	1,38-2	9,77-4	3,22-2	3,43-2	7,87-2
KX 0,06889	8,10-3	5,58-4	1,88-2	2,00-2	4,63-2
	9,90-1	4,04-1	1,52+1	1,68+1	2,18+1
$^{203}\text{Hg} \rightarrow ^{203}\text{Tl}$; 46,612 сут					
0,2792	8,15-1	2,28-1	8,24+0	9,14+0	1,27+1
KX 0,08497	6,48-3	5,51-4	1,66-2	1,80-2	3,80-2
KX 0,08257	1,49-2	1,23-3	3,74-2	4,04-2	8,66-2
KX 0,08211	7,77-3	6,38-4	1,94-2	2,09-2	4,51-2
KX 0,07287	6,55-2	4,77-3	1,54-1	1,65-1	3,74-1
KX 0,07083	3,87-2	2,74-3	9,02-2	9,61-2	2,21-1
	9,48-1	2,38-1	8,55+0	9,48+0	1,35+1
$^{202}\text{Tl} \rightarrow ^{202}\text{Hg}$; 12,6 сут					
0,9597	1,19-3	1,14-3	4,09-2	4,54-2	5,05-2
0,5201	9,14-3	4,75-3	1,80-1	2,00-1	2,41-1
0,4396	9,14-1	4,02-1	1,51+1	1,68+1	2,13+1
KX 0,08258	3,70-2	3,06-3	9,28-2	1,00-1	2,15-1
KX 0,08026	8,78-2	7,05-3	2,15-1	2,32-1	5,06-1
KX 0,07982	4,57-2	3,65-3	1,11-1	1,20-1	2,63-1
KX 0,07082	3,85-1	2,73-2	8,97-1	9,56-1	2,20+0
KX 0,06889	2,26-1	1,56-2	5,24-1	5,57-1	1,29+0
	1,71+0	4,64-1 (4,67-1)	1,72+1	1,90+1	2,60+1
$^{204}\text{Tl} \rightarrow ^{204}\text{Hg}$ (0,0258), ^{204}Pb (0,9742); 3,784 года					
KX 0,08258	6,84-4	5,65-5	1,72-3	1,85-3	3,98-3
KX 0,08077	4,44-5	3,59-6	1,09-4	1,18-4	2,56-4
KX 0,08026	1,62-3	1,30-4	3,96-3	4,27-3	9,34-3
KX 0,07982	8,45-4	6,74-5	2,06-3	2,22-3	4,87-3
KX 0,07082	7,12-3	5,04-4	1,66-2	1,77-2	4,06-2
KX 0,06889	4,19-3	2,89-4	9,71-3	1,03-2	2,40-2
	1,45-2	1,05-3 (1,13-3)	3,42-2	3,65-2	8,30-2

Продолжение табл. 2.2.

E_{0i} , МэВ	Квантовый выход на распад $\lambda_i, \Sigma \lambda_i$, фотон/расп.	$E_{0i} \lambda_i$, $\Sigma E_{0i} \lambda_i$, МэВ/расп.	$\Gamma_{Ki} \Gamma_{K'} =$ $= \Sigma \Gamma_{Ki} \Gamma_{K'}$ $\text{аГр} \cdot \text{м}^2 / (\text{с} \cdot \text{Бк})$	$\Gamma_{Hi} \Gamma_{H'} =$ $= \Sigma \Gamma_{Hi} \Gamma_{H'}$ $\text{аЗв} \cdot \text{м}^2 / (\text{с} \cdot \text{Бк})$	$\Gamma_{H, \text{макс}, i}$ $\Gamma_{H, \text{макс}} =$ $= \Sigma \Gamma_{H, \text{макс}, i}$ $\text{аЗв} \cdot \text{м}^2 / (\text{с} \cdot \text{Бк})$
$^{210}\text{Po} \rightarrow ^{206}\text{Pb}$; 138,376 сут					
0,8020	1,06-5	8,50-6	3,12-4	3,46-4	3,95-4
	1,06-5	8,50-6	3,12-4	3,46-4	3,95-4
$^{226}\text{Ra} \rightarrow ^{222}\text{Rn}$; 1608 лет					
0,2623	5,40-5	1,42-5	5,07-4	5,62-4	7,89-4
0,1860	3,28-2	6,10-3	2,04-1	2,27-1	3,39-1
KX 0,09771	3,36-4	3,28-5	9,75-4	1,07-3	2,08-3
KX 0,09487	6,79-4	6,44-5	1,92-3	2,10-3	4,14-3
KX 0,09424	3,55-4	3,35-5	9,98-4	1,09-3	2,16-3
KX 0,08378	2,98-3	2,50-4	7,57-3	8,19-3	1,74-2
KX 0,08107	1,79-3	1,45-4	4,42-3	4,77-3	1,04-2
	3,90-2	6,64-3 (6,74-3)	2,20-1	2,44-1	3,76-1
^{226}Ra в равновесии с основными дочерними продуктами распада до RaD, 1608 лет*					
2,448	1,55-2	3,79-2	1,06+0	1,18+0	1,26+0
2,43	1,8-5	4,37-5	1,23-3	1,36-3	1,45-3
2,36	1,6-5	3,78-5	1,07-3	1,19-3	1,26-3
2,293	3,24-3	7,43-3	2,12-1	2,36-1	2,51-1
2,28	6-6	1,37-5	3,92-4	4,35-4	4,64-4
2,204	4,99-2	1,10-1	3,18+0	3,53+0	3,77+0
2,119	1,21-2	2,56-2	7,52-1	8,34-1	8,91-1
2,110	8,75-4	1,85-3	5,42-2	6,02-2	6,43-2
2,09	1-5	2,09-5	6,15-4	6,83-4	7,30-4
2,01	1,4-5	2,81-5	8,39-4	9,31-4	9,96-4
1,896	1,77-3	3,36-3	1,02-1	1,13-1	1,21-1
1,890	8,94-4	1,69-3	5,13-2	5,70-2	6,10-2
1,873	2,26-3	4,23-3	1,29-1	1,43-1	1,53-1
1,847	2,12-2	3,92-2	1,20+0	1,33+0	1,42+0
1,838	3,83-3	7,04-3	2,15-1	2,39-1	2,56-1
1,765	1,59-1	2,81-1	8,68+0	9,65+0	1,04+1
1,730	3,05-2	5,28-2	1,64+0	1,82+0	1,96+0
1,684	2,36-3	3,97-3	1,25-1	1,39-1	1,49-1
1,661	1,15-2	1,91-2	6,01-1	6,69-1	7,18-1
1,65	4-6	6,60-6	2,08-4	2,32-4	2,49-4
1,599	3,34-3	5,34-3	1,70-1	1,89-1	2,03-1
1,595	2,65-3	4,23-3	1,35-1	1,50-1	1,61-1
1,59	4-6	6,36-6	2,03-4	2,26-4	2,42-4

Продолжение табл. 2.2'

E_{0i} , МэВ	Квантовый выход на распад $\lambda_i, \Sigma \lambda_i$, фотон/расп.	$E_{0i} \lambda_i$, $\Sigma E_{0i} \lambda_i$, МэВ/расп.	$\Gamma_{Ki} \Gamma_{K'} =$ $= \Sigma \Gamma_{Ki} \Gamma_{K'}$ $\text{аГр} \cdot \text{м}^2 / (\text{с} \cdot \text{Бк})$	$\Gamma_{Hi} \Gamma_{H'} =$ $= \Sigma \Gamma_{Hi} \Gamma_{H'}$ $\text{аЗв} \cdot \text{м}^2 / (\text{с} \cdot \text{Бк})$	$\Gamma_{H, \text{макс}, i}$ $\Gamma_{H, \text{макс}} =$ $= \Sigma \Gamma_{H, \text{макс}, i}$ $\text{аЗв} \cdot \text{м}^2 / (\text{с} \cdot \text{Бк})$
1,583	7,17-3	1,14-2	3,62-1	4,03-1	4,33-1
1,543	3,54-3	5,46-3	1,76-1	1,95-1	2,10-1
1,54	4-6	6,16-6	1,98-4	2,20-4	2,37-4
1,538	4,13-3	6,35-3	2,04-1	2,27-1	2,45-1
1,509	2,19-2	3,30-2	1,07+0	1,19+0	1,28+0
1,49	4-6	5,96-6	1,93-4	2,15-4	2,32-4
1,41	1-5	1,41-5	4,64-4	5,16-4	5,58-4
1,408	2,48-2	3,49-2	1,15+0	1,28+0	1,38+0
1,401	1,39-2	1,95-2	6,41-1	7,13-1	7,72-1
1,385	7,76-3	1,08-2	3,55-1	3,95-1	4,27-1
1,378	4,02-2	5,54-2	1,83+0	2,04+0	2,20+0
1,310	4,2-5	5,50-5	1,84-3	2,05-3	2,22-3
1,304	1,21-3	1,58-3	5,28-2	5,87-2	6,38-2
1,281	1,47-2	1,88-2	6,33-1	7,04-1	7,66-1
1,238	5,92-2	7,33-2	2,48+0	2,76+0	3,01+0
1,210	3,4-5	4,11-5	1,40-3	1,56-3	1,70-3
1,208	4,60-3	5,56-3	1,89-1	2,10-1	2,30-1
1,155	1,69-2	1,95-2	6,72-1	7,46-1	8,18-1
1,134	2,55-3	2,89-3	1,00-1	1,11-1	1,22-1
1,120	1,50-1	1,68-1	5,82+0	6,47+0	7,11+0
1,110	1,4-5	1,554-5	5,40-4	6,00-4	6,59-4
1,070	2,85-3	3,05-3	1,07-1	1,19-1	1,31-1
1,060	2,4-5	2,544-5	8,94-4	9,92-4	1,09-3
1,052	3,15-3	3,31-3	1,17-1	1,29-1	1,43-1
0,9641	3,83-3	3,69-3	1,32-1	1,47-1	1,63-1
0,9341	3,16-2	2,95-2	1,06+0	1,18+0	1,32+0
0,91	6-6	5,46-6	1,97-4	2,19-4	2,45-4
0,86	1,4-5	1,20-5	4,39-4	4,87-4	5,49-4
0,8390	5,87-3	4,92-3	1,80-1	2,00-1	2,26-1
0,8370	1,09-5	9,12-6	3,33-4	3,70-4	4,19-4
0,8062	1,23-2	9,92-3	3,64-1	4,04-1	4,60-1
0,7997	1,04-4	8,32-5	3,06-3	3,39-3	3,87-3
0,795	2-4	1,59-4	5,85-3	6,48-3	7,40-3
0,7861	3,14-3	2,47-3	9,09-2	1,01-1	1,15-1
0,7859	1,09-2	8,57-3	3,16-1	3,50-1	4,00-1
0,7684	4,88-2	3,75-2	1,39+0	1,54+0	1,76+0
0,7660	7,86-4	6,02-4	2,23-2	2,47-2	2,83-2
0,7199	4,03-3	2,90-3	1,08-1	1,20-1	1,39-1
0,7031	4,72-3	3,32-3	1,24-1	1,38-1	1,60-1
0,67	4-6	2,68-6	1,00-4	1,12-4	1,30-4
0,6655	1,56-2	1,04-2	3,89-1	4,32-1	5,06-1

Продолжение табл. 2.2.

E_{0i} , МэВ	Квантовый выход на распад $\lambda_i, \Sigma \lambda_i$, фотон/расп.	$E_{0i} n_i$, $\Sigma E_{0i} n_i$, МэВ/расп.	$\Gamma_{Ki}, \Gamma_K =$ $= \Sigma \Gamma_{Ki}$ аГр·м ² /(с·Бк)	$\Gamma_{Hi}, \Gamma_H =$ $= \Sigma \Gamma_{Hi}$ аЗв·м ² /(с·Бк)	$\Gamma_{H, макс. i}$ $\Gamma_{H, макс} =$ $= \Sigma \Gamma_{H, макс. i}$ аЗв·м ² /(с·Бк)
0,6093	4,61-1	2,81-1	1,06+1	1,17+1	1,40+1
0,5801	3,64-3	2,11-3	7,96-2	8,84-2	1,06-1
0,5337	1,90-3	1,01-3	3,83-2	4,25-2	5,13-2
0,510	7,80-4	3,98-4	1,50-2	1,67-2	2,02-2
0,4871	4,39-3	2,14-3	8,08-2	8,98-2	1,10-1
0,4804	3,38-3	1,62-3	6,13-2	6,81-2	8,37-2
0,48	4-6	1,92-6	7,25-5	8,06-5	9,90-5
0,4621	1,67-3	7,72-4	2,91-2	3,23-2	4,02-2
0,3891	4,13-3	1,61-3	6,01-2	6,69-2	8,77-2
0,382	6-6	2,29-6	8,56-5	9,53-5	1,25-4
0,356	8-6	2,85-6	1,06-4	1,18-4	1,57-4
0,3519	3,71-1	1,31-1	4,85+0	5,39+0	7,19+0
0,2980	5,00-7	1,49-7	5,46-6	6,05-6	8,33-6
0,296	1,6-4	4,74-5	1,73-3	1,92-3	2,65-3
0,2952	1,92-1	5,67-2	2,07+0	2,30+0	3,17+0
0,2745	3,24-3	8,89-4	3,21-2	3,56-2	4,96-2
0,2623	5,40-5	1,42-5	5,07-4	5,62-4	7,89-4
0,2588	5,50-3	1,42-3	5,08-2	5,64-2	7,93-2
0,2419	7,46-2	1,80-2	6,36-1	7,06-1	1,00+0
0,1860	3,28-2	6,10-3	2,04-1	2,27-1	3,39-1
KX 0,09771	3,36-4	3,28-5	9,75-4	1,07-3	2,08-3
0,097	8,0-6	7,76-7	2,31-5	2,52-5	4,93-5
KX 0,09487	6,79-4	6,44-5	1,92-3	2,10-3	4,14-3
KX 0,09424	3,55-4	3,35-5	9,98-4	1,09-3	2,16-3
KX 0,08991	1,13-2	1,02-3	3,05-2	3,32-2	6,73-2
KX 0,08735	2,45-2	2,14-3	6,45-2	7,00-2	1,45-1
KX 0,08683	1,28-2	1,11-3	3,35-2	3,64-2	7,55-2
KX 0,08378	2,98-3	2,50-4	7,57-3	8,19-3	1,74-2
KX 0,08107	1,79-3	1,45-4	4,42-3	4,77-3	1,04-2
KX 0,07929	7,88-6	6,25-7	1,92-5	2,06-5	4,54-5
KX 0,07711	1,07-1	8,25-3	2,58-1	2,77-1	6,14-1
KX 0,07674	5,4-5	4,14-6	1,30-4	1,39-4	3,10-4
KX 0,07481	6,39-2	4,78-3	1,52-1	1,63-1	3,66-1
0,05320	1,318-5	7,01-7	3,27-5	3,37-5	8,20-5
0,05323	1,10-2	5,85-4	2,73-2	2,82-2	6,84-2
	2,24+0	1,71+0	5,78+1	6,42+1	7,41+1

* Данные об энергетическом составе радионуклида ^{210}Pb (RaC'') взяты из [35]. Гамма-постоянная Ra в равновесии с основными дочерними продуктами распада ^{210}Pb изымаемой из обращения мощности экспозиционной дозы после фильтра 0,5 мм Pt во внесистемных единицах принимается равной 8,4 Р·см²/(ч·мКи). Более поздние измерения показали, что это значение несколько меньше.

Исходная информация о E_{0i} и n_i для расчетов гамма-постоянных табл. 2.2 принята по схемам распада [36], периоды полураспада приведены по [37].

В табл. 2.2 не учтены фотоны с энергией до 30 кэВ как не имеющие практического значения вследствие сильного самопоглощения, поглощения в материале фильтров, в воздухе и т. д. Однако для радионуклидов, в энергетическом спектре которых имеются фотоны с $E_0 < 30$ кэВ, в столбцах $\Sigma E_{0i} n_i$ в скобках для оценок приводятся значения с учетом фотонов с энергией меньше 30 кэВ.

При пользовании таблицей обратите внимание, что гамма-постоянные по мощности кермы в воздухе (керма-постоянные) Γ_{Ki} , Γ_K и гамма-постоянные по мощности эквивалентной дозы Γ_{Hi} , Γ_H являются базисными величинами (см. § 1.5), а гамма-постоянные по мощности максимальной эквивалентной дозы $\Gamma_{H, макс. i}$, $\Gamma_{H, макс}$ являются фантомными величинами (см. § 1.5).

Чтобы рассчитать гамма-постоянную по мощности экспозиционной дозы во внесистемных единицах Γ_{χ} , Р·см²/(ч·мКи), необходимо керма-постоянную Γ_K , аГр·м²/(с·Бк), приведенную в четвертом столбце табл. 2.2, умножить на 0,152 [см. формулу (2.21)].

КВАНТОВОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ РАДИОНУКЛИДОВ ПОСЛЕ НАЧАЛЬНОЙ ФИЛЬТРАЦИИ

Стенки ампул и емкостей для препаратов, а также отсекающие и выравнивающие фильтры широко встречаются при работе с радиоактивными источниками. Поэтому необходимо знать характеристики γ -излучения нуклида, прошедшего через тот или иной фильтр.

Практически удобно характеризовать γ -излучение нуклидов гамма-постоянными после начальной фильтра. Такие гамма-постоянные по мощности дозиметрической величины \dot{G} можно рассчитать по формуле

$$\Gamma_G(d, Z) = \sum_{i=1}^m \Gamma_{Gi} \exp(-\mu_i d) B_G(E_{0i}, \mu_i d, Z) = \sum_{i=1}^m \Gamma_{Gi} \kappa_{Gi}, \quad (2.32)$$

где d — толщина фильтра из материала с атомным номером Z , см; μ_i — линейный коэффициент ослабления фотонов в материале фильтра; см⁻¹; $B_G(E_{0i}, \mu_i d, Z)$ — фактор накопления по мощности дозиметрической величины \dot{G} для барьерной геометрии; $\kappa_{Gi} = e^{-\mu_i d} B_G$ — величина, обратная кратности ослабления по мощности дозиметрической величины \dot{G} ; m — число фотонов разных энергий в энергетическом спектре радионуклида.

Заранее невозможно определить гамма-постоянные для всех возможных фильтров. Поэтому рассчитывают значения κ_{Gi} для разных материалов, толщин фильтров и энергий γ -излучения [34], исходя из которых по формуле (2.32) можно рассчитать гамма-постоянные радионуклидов после начальных фильтров.

Значения κ_{Gi} для фильтров из свинца, олова, железа и алюминия приведены в табл. 2.3 [34] для расчета гамма-постоянных после тонких начальных фильтров. Данные для алюминиевых фильтров могут быть использованы при оценках ослабления γ -излучения фильтрами из стекла с пересчетом на плотность.

Таблица 2.3

Зависимость величины κ_{Di} по дозе в воздухе
от энергии γ -излучения для фильтров из различных материалов

Энергия γ -излучения, МэВ	Толщина фильтра, см				
	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5
Свинцовые фильтры ($\rho = 11,34 \text{ г/см}^3$)					
0,1	0,0026	—	—	—	—
0,2	0,38	0,14	0,053	0,020	0,0073
0,3	0,62	0,42	0,26	0,17	0,11
0,4	0,72	0,60	0,48	0,41	0,31
0,5	0,80	0,72	0,63	0,55	0,48
0,8	0,94	0,86	0,78	0,73	0,70
1,0	0,95	0,90	0,86	0,81	0,75
1,5	0,97	0,92	0,89	0,86	0,83
2,0	0,97	0,93	0,90	0,87	0,83
3,0	0,97	0,93	0,90	0,87	0,83
4,0	0,96	0,92	0,90	0,86	0,82
Оловянные фильтры ($\rho = 7,29 \text{ г/см}^3$)					
Энергия γ -излучения, МэВ	Толщина фильтра, см				
	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5
0,1	0,33	0,11	0,035	0,011	0,004
0,2	0,83	0,68	0,57	0,46	0,39
0,3	0,92	0,85	0,79	0,72	0,67
0,4	0,95	0,90	0,87	0,82	0,78
0,5	0,97	0,93	0,90	0,87	0,84
0,8	0,98	0,96	0,94	0,92	0,89
1,0	0,98	0,96	0,95	0,93	0,91
1,5	0,99	0,97	0,96	0,94	0,92
2,0	0,99	0,98	0,96	0,95	0,93
3,0	0,98	0,97	0,96	0,94	0,92
4,0	0,98	0,97	0,95	0,93	0,91
Железные фильтры ($\rho = 7,89 \text{ г/см}^3$)					
Энергия γ -излучения, МэВ	Толщина фильтра, см				
	0,1	0,2	0,5	1,0	1,5
0,1	0,77	0,45	0,30	0,098	0,029
0,2	0,92	0,80	0,68	0,49	0,32
0,3	0,95	0,88	0,76	0,60	0,44
0,4	0,97	0,90	0,81	0,68	0,54
0,5	0,97	0,92	0,87	0,76	0,60
0,8	0,97	0,94	0,89	0,79	0,70
1,0	0,98	0,95	0,90	0,84	0,74

Продолжение табл. 2.3

Энергия γ -излучения, МэВ	Толщина фильтра, см				
	0,1	0,2	0,5	1,0	1,5
1,5	0,98	0,95	0,92	0,85	0,78
2,0	0,99	0,95	0,93	0,85	0,79
3,0	0,99	0,95	0,92	0,85	0,79
4,0	0,98	0,95	0,92	0,84	0,77
Алюминиевые фильтры ($\rho = 2,7 \text{ г/см}^3$)					
Энергия γ -излучения, МэВ	Толщина фильтра, см				
	0,1	0,3	0,5	1,0	1,5
0,1	0,96	0,90	0,80	0,73	0,62
0,2	0,96	0,92	0,91	0,81	0,74
0,3	0,97	0,96	0,93	0,89	0,85
0,4	0,97	0,96	0,94	0,90	0,87
0,5	0,98	0,97	0,95	0,91	0,89
0,8	0,99	0,97	0,97	0,92	0,91
1,0	0,99	0,98	0,97	0,94	0,92
1,5	0,996	0,98	0,97	0,95	0,93
2,0	0,998	0,98	0,97	0,96	0,93
3,0	0,998	0,99	0,98	0,96	0,94
4,0	0,998	0,99	0,98	0,96	0,94

§ 2.3. КЕРМА-ЭКВИВАЛЕНТ РАДИОНУКЛИДНОГО ИСТОЧНИКА

Для многих практических задач источники, испускающие γ -излучение, удобно сравнивать по дозиметрическим характеристикам, определяемым в тождественных условиях.

γ -Излучающие источники, создающие при тождественных условиях одинаковую мощность воздушной кермы, имеют одинаковый керма-эквивалент [5, 9]. Таким образом, керма-эквивалент является характеристикой радионуклидного препарата.

Керма-эквивалент источника k_e — мощность воздушной кермы K фотонного излучения с энергией фотонов больше заданного порогового значения δ точечного изотропно излучающего источника в вакууме на расстоянии r от источника, умноженная на квадрат этого расстояния,

$$k_e = Kr^2. \quad (2.33)$$

Единица керма-эквивалента — *грей-метр в квадрате в секунду* ($\text{Гр} \cdot \text{м}^2/\text{с}$). Как и для гамма-постоянных, рекомендуется принимать $\delta = 30 \text{ кэВ}$ (см. § 2.2).

Физический смысл керма-эквивалента — мощность воздушной кермы, создаваемая фотонами на расстоянии $r = 1 \text{ м}$ от данного точечного изотропно радионуклидного источника в вакууме.

Из определения очевидно, что керма-эквивалент k_e , аГр·м²/с, связан с активностью A , Бк, через керма-постоянную Γ_K , аГр·м²/(с·Бк), соотношением

$$k_e = A\Gamma_K. \quad (2.34)$$

Из определения керма-эквивалента легко определить мощность воздушной кермы \dot{K} на расстоянии r от точечного изотропного радионуклида с керма-эквивалентом k_e по формуле

$$\dot{K} = k_e/r^2. \quad (2.35)$$

До последнего времени широко использовалась на практике нестандартная величина — *радиевый гамма-эквивалент**¹, предназначенный для оценки поля γ -излучения в воздухе по экспозиционной дозе.

В этой величине в качестве стандартного принималось γ -излучение ²²⁶Ra в равновесии с основными дочерними продуктами распада*² после фильтра из платины толщиной 0,5 мм.

Внесистемная единица радиевого гамма-эквивалента — *миллиграмм-эквивалент радия* (мг-экв. Ra).

Миллиграмм-эквивалент радия равен радиевому гамма-эквиваленту радиоактивного источника, γ -излучение которого при данной фильтрации и тождественных условиях измерения создает такую же мощность экспозиционной дозы, как и γ -излучение 1 мг Государственного эталона радия в равновесии с основными дочерними продуктами распада при платиновом фильтре толщиной 0,5 мм. Известно, что 1 мг радия соответствует активности примерно $3,7 \cdot 10^7$ Бк или 1 мКи, а гамма-постоянная радия в равновесии с основными дочерними продуктами распада по мощности экспозиционной дозы после фильтра 0,5 мм Pt во внесистемных единицах равна $\Gamma_K = 8,4 \text{ Р} \cdot \text{см}^2/(\text{ч} \cdot \text{мКи})$ (табл. 2.2). Тогда очевидно, что гамма-эквивалент m любого радиоактивного препарата активностью A_0 , мКи, можно определить через гамма-постоянную Γ_K , Р·см²/(ч·мКи), из соотношения

$$m = A_0\Gamma_K/8,4. \quad (2.36)$$

Для связи керма-эквивалента k_e , нГр·м²/с, с внесистемной величиной гамма-эквивалента m , мг-экв. Ra, поделим соответственно левые и правые части соотношений (2.34) и (2.36). Тогда можно записать: $k_e/m = (A\Gamma_K \cdot 10^{-9}) : (A_0\Gamma_K/8,4) = (A/A_0)(\Gamma_K/\Gamma_K) \cdot 10^{-9} \cdot 8,4 = 3,7 \cdot 10^7 \cdot 6,55 \times 10^{-9} \cdot 8,4 = 2,04$. При записи последнего отношения учтено, что в формуле (2.34) k_e выражено в аГр·м²/с, A/A_0 численно равно $3,7 \cdot 10^7$, Γ_K/Γ_K численно равно 6,55 [см. формулу (2.20)]. Следовательно,

$$k_e = 2,04m \text{ (приближенно)}. \quad (2.37)$$

Заметим, что k_e и m — разные физические величины. Поэтому равенство (2.37) следует понимать условно, как означающее, что k_e соответствует 2,04 m .

Керма-эквивалент введен для точечного изотропного источника. Поле объемного изотропного источника рассчитывается как суперпозиция точечных изотропных источников с учетом самопоглощения, воз-

*¹ Радиевый гамма-эквивалент часто называют гамма-эквивалентом Ra.

*² С основными дочерними продуктами распада до Ra(C+C'+C'') включительно.

можного ослабления излучения в окружающей источник среде и рассеяния по методикам, изложенным ниже.

Если назвать введенный выше керма-эквивалент k_e гамма-эквивалентом по мощности воздушной кермы, то по аналогии с гамма-постоянными по мощности различных дозиметрических величин можно ввести *гамма-эквиваленты по мощности различных дозиметрических величин*, например гамма-эквивалент по мощности эквивалентной дозы h_e , гамма-эквивалент по мощности максимальной эквивалентной дозы $h_{\text{макс.е}}$ и т. д.

Гамма-эквивалент g_e по мощности дозиметрической величины \dot{G} может быть в общем виде определен как мощность дозиметрической величины \dot{G} фотонного излучения точечного изотропно излучающего источника в вакууме на расстоянии r от источника, умноженная на квадрат этого расстояния r :

$$g_e = \dot{G}r^2. \quad (2.38)$$

Используя формулу (2.23), легко получить

$$g_e = \dot{G}r^2 = A\Gamma_G. \quad (2.39)$$

§ 2.4. РАДИОАКТИВНЫЕ НУКЛИДЫ КАК β -ИЗЛУЧАТЕЛИ

Под β -излучателем понимается электронное излучение, возникающее при β -распаде ядер. В табл. 2.4 приведены характеристики β -излучения широко используемых нуклидов. Таблица составлена по данным [38], кроме периодов полураспада, заимствованных из [37].

Таблица 2.4

Характеристики β -излучения радиоактивных нуклидов

Нуклид и дочерний продукт	$T_{1/2}$	Q, E^* , кэВ	$E_{\beta, \text{max}}$, кэВ	$n_{\beta, \text{max}}$, %	$\bar{E}_{\beta, \text{max}}$, кэВ/β-част.	$\bar{E}_{\beta, \text{расп.}}$, кэВ/расп.
³ H (B) → ³ He	12,33 года	18,57	18,6	100	5,7	5,7
¹⁴ C (B) → ¹⁴ N	5730 лет	156,47	156,5	100	49,4	49,4
¹⁹ F (A) → ¹⁹ O	7,13 с	10418,6	1546,9	1,0	630	2694
			3299,9	4,9	1460	
			4287,9	68	1940	
			4368,4	0,011	1996	
			10418,6	26	4980	
²⁴ Na (A) → ²⁴ Mg	14,956 ч	5513,0	276,9	0,053	89	553,4
			1274,6	0,0005	502	
			1390,2	99,944	554	
			4144,4	0,003	1864	
²⁷ Mg (A) → ²⁷ Al	9,46 мин	2609,3	1594,8	29,0	645	701,2
			1765,5	71,0	724	
²⁸ Mg (A) → ²⁸ Al	21,1 ч	1831,8	211,8	4,6	65	154,0
			458,9	94	156	
			859,6	1,4	319	
²⁸ Al (A) → ²⁸ Si	2,2407 мин	4643,1	2864,2	99,99	1241,7	1241,7
			³¹ Si (A) → ³¹ P	2,62 ч	1490,8	224,6
			1490,8	99,93	595	

Продолжение табл. 2.4

Нуклид и дочерний продукт	$T_{1/2}$	Q, E^* , кэВ	$E_{\beta, \gamma}$, кэВ	$n_{\beta, \gamma}$, %	$\bar{E}_{\beta, \gamma}$, кэВ/ β -част.	$\bar{E}_{\beta, \gamma}$, кэВ/ β -расп.
$^{32}_{15}\text{P}(\text{B}) \rightarrow ^{32}_{16}\text{S}$	14,282 сут	1710,4	1710,4	100	694,5	694,5
$^{35}_{16}\text{S}(\text{B}) \rightarrow ^{35}_{17}\text{Cl}$	87,5 сут	167,47	167,5	100	48,8	48,8
$^{39}_{17}\text{Cl}(\text{A}) \rightarrow ^{38}_{18}\text{Ar}$	37,24 мин	4917,2	1107,2	32,5	420	1527,8
			2749,6	11,4	1181	
			4917,2	56,0	2241	
$^{40}_{19}\text{K}(\text{A}) \rightarrow ^{40}_{18}\text{Ar}$, $^{40}_{20}\text{Ca}$	$1,262 \cdot 10^9$ лет	1311,6	1311,6	89,3	508	453,9
$^{42}_{19}\text{K}(\text{A}) \rightarrow ^{42}_{20}\text{Ca}$	12,360 ч	3521,1	74,2	0,07	20	1424,5
			1097,0	0,05	413	
			1683,6	0,32	699	
			1996,4	17,5	799	
			3521,1	82,1	1562	
$^{45}_{20}\text{Ca}(\text{A}) \rightarrow ^{45}_{21}\text{Sc}$	163,8 сут	256,9	244,4	0,0019	92	77,2
			256,9	99,9981	77	
$^{46}_{21}\text{Sc}(\text{A}) \rightarrow ^{46}_{22}\text{Ti}$	83,81 сут	2367,1	357,3	99,9964	112	112,0
			1477,8	0,0036	658	
$^{56}_{25}\text{Mn}(\text{A}) \rightarrow ^{56}_{26}\text{Fe}$	2,579 ч	3694,5	249,3	0,019	73	829,1
			324,8	1,16	99	
			571,6	0,040	190	
			734,6	14,6	255	
			1037,0	27,8	381	
			1609,5	0,06	635	
			2847,7	56,3	1215	
$^{59}_{26}\text{Fe}(\text{A}) \rightarrow ^{59}_{27}\text{Co}$	44,496 сут	1564,8	83,2	0,090	22	117,4
			130,5	1,29	36	
			273,2	45,2	81	
			374,8	0,0001	158	
			465,5	53,1	149	
			1564,8	0,18	520	
$^{60}_{27}\text{Co}(\text{A}) \rightarrow ^{60}_{28}\text{Ni}$	5,2709 года	2823,58	317,8	99,92	96	96,2
			664,8	0,005	274	
			1491,1	0,08	624	
$^{63}_{28}\text{Ni}(\text{B}) \rightarrow ^{63}_{29}\text{Cu}$	100,1 года	65,87	65,9	100	17,1	17,1
$^{64}_{29}\text{Cu}(\text{A}) \rightarrow ^{64}_{30}\text{Zn}$	12,703 ч	578,2	578,2	37,1	190,1	190,1
$^{74}_{33}\text{As}(\text{A}) \rightarrow ^{74}_{34}\text{Se}$, $^{74}_{32}\text{Ge}$	17,77 сут	1353,1	83,5	0,038	22	137,1
			718,3	15,4	243	
			1353,1	18,8	531	
$^{76}_{33}\text{As}(\text{A}) \rightarrow ^{76}_{34}\text{Se}$	26,32 ч	2963,5	293,7	100	—	1066,3
			2963,5	—	—	—
$^{82}_{36}\text{Br}(\text{A}) \rightarrow ^{82}_{36}\text{Kr}$	35,32 ч	3092,7	264,7	1,36	76	137,0
			444,4	98,6	138	
$^{85\text{m}}_{36}\text{Kr}(\text{A}) \rightarrow ^{85}_{36}\text{Kr}$, $^{87}_{37}\text{Rb}$	4,48 ч	687,0	840,7	79,0	290	230,9
		+ 304,86	—	—	—	—
$^{85}_{36}\text{Kr}(\text{A}) \rightarrow ^{85}_{37}\text{Rb}$	10,72 года	687,0	170,0	0,437	47	250,7
			687,0	99,563	252	
$^{84}_{37}\text{Rb}(\text{A}) \rightarrow ^{84}_{36}\text{Kr}$, $^{84}_{38}\text{Sr}$	32,9 сут	890,0	890,0	4,0	323	11,6
$^{87}_{37}\text{Rb}(\text{A}) \rightarrow ^{87}_{38}\text{Sr}$	18,63 сут	1774,6	698,0	8,78	259	668,9
			1774,6	91,22	708	

Продолжение табл. 2.4

Нуклид и дочерний продукт	$T_{1/2}$	Q, E^* , кэВ	$E_{\beta, \gamma}$, кэВ	$n_{\beta, \gamma}$, %	$\bar{E}_{\beta, \gamma}$, кэВ/ β -част.	$\bar{E}_{\beta, \gamma}$, кэВ/ β -расп.
$^{89}_{38}\text{Sr}(\text{B}) \rightarrow ^{89}_{39}\text{Y}$, $^{89}_{39}\text{Y}$	50,62 сут	1492,1	582,0	0,00095*	188	583,5
			1492,1	100	584	
$^{90}_{38}\text{Sr}(\text{B}) \rightarrow ^{90}_{39}\text{Y}$	29,2 года	546	546,0	100	196,1	196,1
$^{90}_{39}\text{Y}(\text{A}) \rightarrow ^{90}_{40}\text{Zr}$	64,26 ч	2279,2	518,5	0,016	185	930,6
			2279,2	99,9885	931	
$^{91}_{39}\text{Y}(\text{A}) \rightarrow ^{91}_{40}\text{Zr}$	58,51 сут	1543,0	338,1	0,30	100	602,3
			1543,0	99,70	604	
$^{95}_{40}\text{Zr}(\text{A}) \rightarrow ^{95\text{m}}_{41}\text{Nb}$, $^{95}_{41}\text{Nb}$	64,02 сут	1123,1	366,4	54,6	109	116,9
			298,9	44,2	120	
			887,4	1,11	327	
			1123,1	0,10	405	
$^{95}_{41}\text{Nb}(\text{A}) \rightarrow ^{95}_{42}\text{Mo}$	34,979 сут	925,6	159,7	99,95	43	43,5
			721,5	0,018	283	
			925,6	0,030	322	
$^{99}_{42}\text{Mo}(\text{A}) \rightarrow ^{99\text{m}}_{43}\text{Tc}$, $^{99}_{43}\text{Tc}$	66,02 ч	1356,7	157,9	0,0010	54	387,4
			214,9	0,111	60	
			227,6	0,010	78	
			352,7	0,134	104	
			436,2	16,55	133	
			847,6	1,17	289	
			1214,0	81,96	441	
$^{99}_{43}\text{Tc}(\text{A}) \rightarrow ^{99}_{44}\text{Ru}$	$2,13 \cdot 10^5$ лет	293,5	204,1	0,0012	82	96,5
			293,5	100	97	
$^{103}_{44}\text{Ru}(\text{A}) \rightarrow ^{103\text{m}}_{45}\text{Rh}$, $^{103}_{45}\text{Rh}$	39,254 сут	762,9	111,1	0,091	37	63,0
			112,8	6,63	30	
			155,2	0,0011	52	
			226,0	92,2	63	
			405,5	0,0091	141	
			467,9	0,243	164	
			762,9	0,87	274	
$^{106}_{44}\text{Ru}(\text{B}) \rightarrow ^{106}_{45}\text{Rh}$, $^{106}_{45}\text{Rh}(\text{A}) \rightarrow ^{106}_{46}\text{Pd}$	371,6 сут 30 с	39,4 3541	39,4 219,9	100 100	10,1 —	10,1 1409,2
			3541,0	—	—	—
$^{110\text{m}}_{47}\text{Ag}(\text{A}) \rightarrow ^{110}_{47}\text{Ag}$, $^{110}_{48}\text{Cd}$	249,76 сут	2892,8 + 117,59	83,6	67,1	22	69,0
			133,6	0,41	44	
			167,9	0,030	56	
			217,0	0,012	73	
			350,5	0,023	103	
			449,1	0,03	136	
			470,7	0,08	144	
			530,4	30,56	165	
			722,9	0,0058	238	
			759,8	0,088	252	
			932,3	0,032	321	
			1467,9	0,6	548	
$^{110}_{47}\text{Ag}(\text{A}) \rightarrow ^{110}_{48}\text{Cd}$, $^{110}_{46}\text{Pd}$	24,6 с	2892,8	230,8	0,0063	64	1179,2
			561,0	0,0072	177	
			605,4	0,0022	193	
			813,9	0,0022	292	
			814,1	0,0076	273	

Продолжение табл. 2.4

Нуклид и дочерний продукт	$T_{1/2}$	$Q, E^*,$ кэВ	$E_{\beta},$ кэВ	$n_{\beta}, \%$	$\bar{E}_{\beta},$ кэВ/В-част.	$\bar{E}_{\beta},$ кэВ/расп.
$^{111}_{47}\text{Ag}(\text{A}) \rightarrow ^{111}_{48}\text{Cd}$	7,45 сут	1028	1109,4	0,0121	394	348,7
			1161,3	0,0009	416	
			1417,1	0,0099	526	
			1419,8	0,0382	527	
			2235,3	4,42	893	
			2892,8	95,20	1197	
			161,3	0,013	44	
163,2	0,009	55				
273,3	0,004	93				
407,8	0,022	141				
685,9	7,1	227				
782,6	1,0	279				
1028,0	92	359				
$^{114}_{49}\text{In}(\text{A}) \rightarrow ^{114}_{50}\text{Sn},$ $^{114}_{48}\text{Cd}$	71,9 с	1984,5	684,7	0,14	222	770,9
			1984,5	99,36	776	
$^{115}_{49}\text{mIn}(\text{A}) \rightarrow ^{115}_{49}\text{In},$ $^{115}_{50}\text{Sn}$	4,468 ч	495 + 336,24	333,9	0,047	97	13,9
			831,2	5,0	279	
$^{123}_{50}\text{Sn}(\text{A}) \rightarrow ^{123}_{51}\text{Sb}$	129,2 сут	1397	59,6	0,00098	15	521,6
			136,1	0,00014	36	
			215,7	0,0022	60	
			328,4	0,60	95	
			366,8	0,031	108	
			1397,0	99,37	524	
$^{124}_{51}\text{Sb}(\text{A}) \rightarrow ^{124}_{52}\text{Te}$	60,20 сут	2905,0	19,0	—	—	384,4
			2302,3	—	—	
$^{131}_{53}\text{I}(\text{A}) \rightarrow ^{131}_{54}\text{Xe},$ $^{131}_{54}\text{Xe}$	8,0123 сут	970,8	247,9	2,13	69	181,6
			303,9	0,62	87	
			333,8	7,36	97	
			606,3	89,4	191	
			629,7	0,06	200	
			806,9	0,42	284	
$^{133}_{53}\text{I}(\text{A}) \rightarrow ^{133}_{54}\text{Xe},$ $^{133}_{54}\text{Xe}$	20,9 ч	1760	170,1	0,414	46	405,9
			373,9	1,24	110	
			409,7	0,396	122	
			461,8	3,74	140	
			523,6	3,12	161	
			707,7	0,541	229	
			884,7	4,15	298	
			1016,3	1,81	351	
			1230,1	83,5	440	
			1526,7	1,07	574	
			$^{133}_{54}\text{Xe}(\text{A}) \rightarrow ^{133}_{55}\text{Cs}$	5,247 сут	427	
266,8	0,66	75				
346,0	99,34	100				
326,6	0,0002	94				
$^{135\text{m}}_{54}\text{Xe}(\text{A}) \rightarrow ^{135}_{54}\text{Xe},$ $^{135}_{55}\text{Cs}$	15,65 мин	1158 + 526,56	492,6	0,00003	150	0,011
			551,6	0,0002	171	
			897,6	0,004	303	
			95,6	0,12	25	
$^{135}_{54}\text{Xe}(\text{A}) \rightarrow ^{135}_{55}\text{Cs}$	9,10 ч	1158	176,7	0,075	48	301,9
			—	—	—	

Продолжение табл. 2.4

Нуклид и дочерний продукт	$T_{1/2}$	$Q, E^*,$ кэВ	$E_{\beta},$ кэВ	$n_{\beta}, \%$	$\bar{E}_{\beta},$ кэВ/В-част.	$\bar{E}_{\beta},$ кэВ/расп.
$^{132}_{55}\text{Cs}(\text{A}) \rightarrow ^{132}_{54}\text{Xe},$ $^{132}_{56}\text{Ba}$	6,479 сут	1271	519,8	3,15	171	4,7
			750,0	0,69	245	
			908,2	96,0	307	
			142,0	0,064	46	
$^{134}_{55}\text{Cs}(\text{A}) \rightarrow ^{134}_{54}\text{Xe},$ $^{134}_{56}\text{Ba}$	2,062 года	2058,5	239,5	0,363	67	157,3
			806,5	1,6	267	
			88,6	27,40	23	
			415,2	2,48	123	
$^{136}_{55}\text{Cs}(\text{A}) \rightarrow ^{136}_{56}\text{Ba}$	13,16 сут	2548,1	658,0	70,11	210	100,0
			890,6	0,45	300	
			1453,8	0,008	534	
			174,4	2,3	47	
			191,5	0,21	52	
			341,0	94	99	
$^{137}_{55}\text{Cs}(\text{B}) \rightarrow ^{137\text{m}}_{56}\text{Ba},$ $^{137}_{56}\text{Ba},$	30,0 лет	1173,2	407,9	1,2	121	179,3
			494,3	0,1*	151	
			681,5	1,8	219	
			511,5	94,43	174	
$^{140}_{56}\text{Ba}(\text{A}) \rightarrow ^{140}_{57}\text{La}$	12,746 сут	1035	1173,2	5,57	272	276,5
			453,8	24,42	136	
			567,4	9,85	176	
			872,4	3,81	306	
$^{140}_{57}\text{La}(\text{A}) \rightarrow ^{140}_{58}\text{Ce}$	40,280 ч	3760	991,2	39,2	339	542,6
			1005,0	22,7	357	
			262,0	100	—	
			3760,0	—	—	
$^{141}_{58}\text{Ce}(\text{A}) \rightarrow ^{141}_{59}\text{Pr}$	32,50 сут	580	434,6	70,5	130	141,6
			580,0	29,5	181	
$^{144}_{58}\text{Ce}(\text{A}) \rightarrow ^{144\text{m}}_{59}\text{Pr},$ $^{144}_{59}\text{Pr}$	285,8 сут	318,2	184,7	20,1	50	78,4
			238,1	3,1	66	
$^{144\text{m}}_{59}\text{Pr}(\text{A}) \rightarrow ^{144}_{59}\text{Pr},$ $^{144}_{60}\text{Nd}$	7,2 мин	2996,0 + 59,03	318,2	77,0	86	14,5
			109,4	0,026	29	
$^{144}_{60}\text{Nd}$	17,28 мин	2996,0	473,2	0,0086	143	1188,1
			1544,4	0,022	569	
$^{147}_{61}\text{Pm}(\text{A}) \rightarrow ^{147}_{62}\text{Sm}$	2,623 года	224,8	50,4	100	—	62,0
			2996,0	—	—	
			27,4	0,000047	8	
$^{148}_{61}\text{Pm}(\text{A}) \rightarrow ^{148}_{62}\text{Sm}$	5,37 сут	2473	103,5	0,0057	27	720,1
			224,8	99,994	62	
			159,0	100	—	
$^{152}_{63}\text{Eu}(\text{A}) \rightarrow ^{152}_{64}\text{Gd},$ $^{152}_{62}\text{Sm}$	13,2 года	1819,2	2473,0	—	—	82,8
			126,8	27,886	—	
$^{154}_{63}\text{Eu}(\text{A}) \rightarrow ^{154}_{62}\text{Sm},$ $^{154}_{64}\text{Gd}$	8,8 года	19,67	1474,9	—	—	225,5
			72,3	100	—	
$^{155}_{63}\text{Eu}(\text{A}) \rightarrow ^{155}_{64}\text{Gd}$	4,68 года	246,6	1843,9	—	—	44,1
			100,5	0,77	26	
			128,6	2,0	34	
$^{155}_{63}\text{Eu}(\text{A}) \rightarrow ^{155}_{64}\text{Gd}$	4,68 года	246,6	141,3	48,3	38	44,1
			160,1	27,2	43	

Продолжение табл. 2.4

Нуклид и дочерний продукт	$T_{1/2}$	Q, E^* , кэВ	E_{β_i} , кэВ	n_{β_i} , %	\bar{E}_{β_i} , кэВ/ β -част.	\bar{E}_{β} , кэВ/расп.
$^{156}_{63}\text{Eu}(\text{A}) \rightarrow ^{156}_{64}\text{Gd}$	15,19 сут	2453	186,6	8,7	51	396,1
			246,6	13	69	
			2453,0	100	—	
$^{181}_{72}\text{Hf}(\text{A}) \rightarrow ^{181}_{73}\text{Ta}$	42,38 сут	1030	411,4	5,7	120	130,8
			414,8	77,0	121	
			547,8	17,2	177	
			—	—	—	
$^{192}_{77}\text{Ir}(\text{A}) \rightarrow ^{192}_{78}\text{Pt}$, $^{192}_{76}\text{Os}$	73,83 сут	1456,9	51,0	0,0032	13	171,4
			78,9	0,108	20	
			255,9	5,55	71	
			536,0	41,6	161	
			672,3	48,1	209	
$^{198}_{79}\text{Au}(\text{A}) \rightarrow ^{198}_{80}\text{Hg}$	2,695 сут	1372,5	284,8	1,3	79	304,4
			960,7	98,7	307	
			1372,5	0,025	466	
			—	—	—	
$^{203}_{80}\text{Hg}(\text{A}) \rightarrow ^{203}_{81}\text{Tl}$	46,612 сут	491,4	212,2	100	58	57,7
			491,4	0,004	154	
$^{204}_{81}\text{Tl}(\text{B}) \rightarrow ^{204}_{80}\text{Hg}$, $^{204}_{82}\text{Pb}$	3,784 года	763,4	763,4	97,45	244	237,4
			—	—	—	
$^{208}_{81}\text{Tl}(\text{A}) \rightarrow ^{208}_{82}\text{Pb}$	3,055 мин	4992	511,8	100	—	559,4
			1794,6	—	—	

* Не окончательно установленные значения.

В табл. 2.4 приведены следующие характеристики для каждого нуклида: а) атомные массы и атомные номера радионуклида и его дочерних продуктов (указаны после стрелки). Эти данные позволяют легко определить тип распада нуклида. Стабильные дочерние нуклиды подчеркнуты. Если дочерние нуклиды радиоактивные, следует учесть излучение дочерних продуктов, для этого необходимо найти место нуклида в цепочках радиоактивного распада (см. § 2.6). Рядом с химическим символом нуклида в скобках буквой А отмечены нуклиды с хорошо изученной схемой распада, буквой В — «чистые» β -излучатели; б) период полураспада $T_{1/2}$; в) Q — разность энергий между основными состояниями материнского и дочернего ядер, кэВ; E^* — энергия возбужденного состояния материнского ядра, кэВ; печатается, если $E^* \neq 0$, после знака «+»; г) данные об энергетическом спектре β -излучения нуклида: E_{β_i} , кэВ, — граничная энергия спектра β -излучения i -го β -перехода (наибольшая энергия β -частиц в непрерывном энергетическом спектре β -излучения i -го β -перехода); \bar{E}_{β_i} , кэВ/ β -частица, — средняя энергия спектра β -излучения i -го β -перехода на 1 β -частицу (средняя энергия β -частиц, определяемая по энергетическому спектру β -излучения i -го β -перехода); n_{β_i} , % — выход β -частиц i -го β -перехода; \bar{E}_{β} , кэВ/распад, — средняя энергия спектра β -излучения радионуклида на 1 распад ядра (средняя энергия β -частиц, определенная по энергетическому спектру β -излучения данного радионуклида).

Для ряда радионуклидов с большим количеством β -переходов разных энергий (более 15) энергетический спектр в табл. 2.4 не приводится, а указывается только диапазон изменения энергии β -частиц.

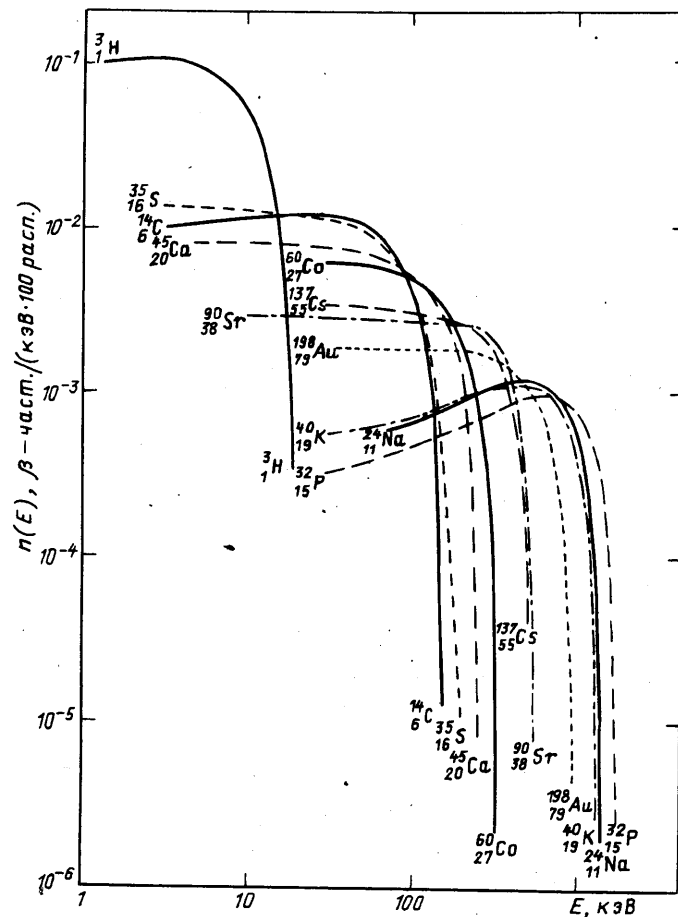


Рис. 2.1. Энергетические распределения β -частиц широко используемых радионуклидов

На графиках рис. 2.1 приведены спектры $n(E)$ наиболее широко применяемых радионуклидов [38].

§ 2.5. ТОРМОЗНОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ РАДИОНУКЛИДОВ

Гамма-постоянные нуклидов не учитывают вклад в дозиметрические величины от тормозного излучения, образующегося при торможении β -частиц или электронов внутренней конверсии в веществе источника или окружающем препарат фильтре. Для большинства нуклидов выход тормозного излучения пренебрежимо мал по сравнению с основным γ -излучением. Однако некоторые нуклиды дают заметное тормозное излучение, например ^{86}Rb , ^{140}Ba , ^{140}La , ^{156}Eu , ^{170}Tm , ^{198}Au .

Выход тормозного излучения можно оценить по следующим формулам: при торможении β -частиц, обладающих непрерывным спектром [39],

$$Y_{\beta} = 1,23 \cdot 10^{-4} (\bar{Z} + 3) \sum_{i=1}^m E_{\beta_i}^2 n_{\beta_i}; \quad (2.40)$$

при торможении моноэнергетических электронов, например электронов внутренней конверсии [39, 40],

$$Y_c = c \cdot 10^{-4} \bar{Z} \sum_{i=1}^m E_{c_i}^b n_{c_i}. \quad (2.41)$$

В этих формулах Y_{β} и Y_c — выход тормозного излучения, МэВ/распад; \bar{Z} — атомный номер вещества, в котором происходит торможение электронов; n_{β_i} , n_{c_i} — выход β -частиц и моноэнергетических электронов на один распад ядра соответственно; E_{β_i} и E_{c_i} — граничная энергия β -излучения и энергия моноэнергетических электронов i -й энергетической группы соответственно, МэВ; m — число энергетических групп β -частиц или моноэнергетических электронов в спектре нуклида.

Эти формулы выведены в предположении полного поглощения электронов в источнике.

Для сложных химических соединений \bar{Z} определяют по формуле

$$\bar{Z} = \frac{\sum_{i=1}^l \alpha_i Z_i^2}{\sum_{i=1}^l \alpha_i Z_i}, \quad (2.42)$$

где α_i — доля общего числа атомов соединения, имеющих атомный номер Z_i ; l — число элементов в химическом соединении.

В [39] для формулы (2.41), рекомендуемой для электронов с энергией не выше 1 МэВ, приняты коэффициенты $c=5,77$; $b=2$.

Лучшие результаты дают расчеты с использованием коэффициентов c и b для энергий электронов 0,2—2,8 МэВ из экспериментальной работы [40] (табл. 2.5).

Таблица 2.5

Значения коэффициентов c и b в формуле (2.41) для материалов с различными атомными номерами Z [40]

Z	c	b	Z	c	b
4	3,5	2,16	50	3,2	2,07
13	3,5	2,02	79	3,0	1,90
26	3,3	1,91			

Выражение (2.40) выведено для β -излучателей со спектром, подобным по форме β -спектру ^{32}P (рис. 2.1). Оценочные расчеты показывают [41], что если форма β -спектра отлична от последнего, то погрешность расчета по этой формуле, например, для β -излучателя ^{35}S , достигает 42 %.

Влияние формы β -спектра меньше сказывается на результатах расчетов выхода тормозного излучения при полном торможении β -частиц, если использовать формулу [41]

$$Y_{\beta} = 8,5 \cdot 10^{-4} (Z + 3) \sum_{i=1}^m \bar{E}_{\beta_i}^2 n_{\beta_i}, \quad (2.43)$$

где Y_{β} дано в МэВ/распад; \bar{E}_{β_i} — средняя энергия β -частиц i -й энергетической группы, МэВ (табл. 2.4).

Дозиметрические величины тормозного излучения можно рассчитать по данным табл. 2.6 об энергетическом распределении интенсивности тормозного излучения [39].

Таблица 2.6

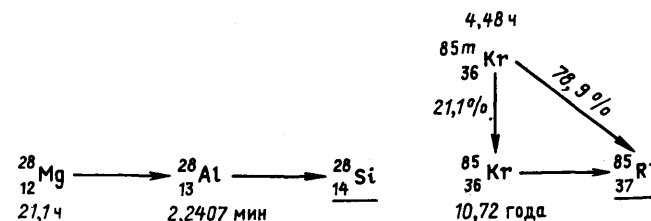
Энергетическое распределение тормозного излучения

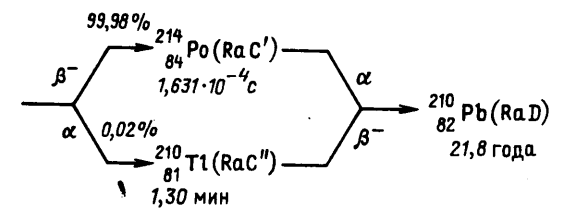
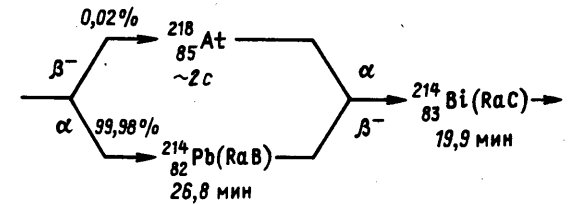
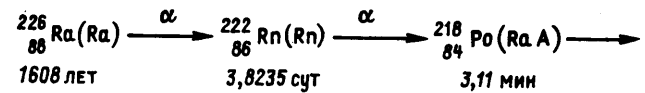
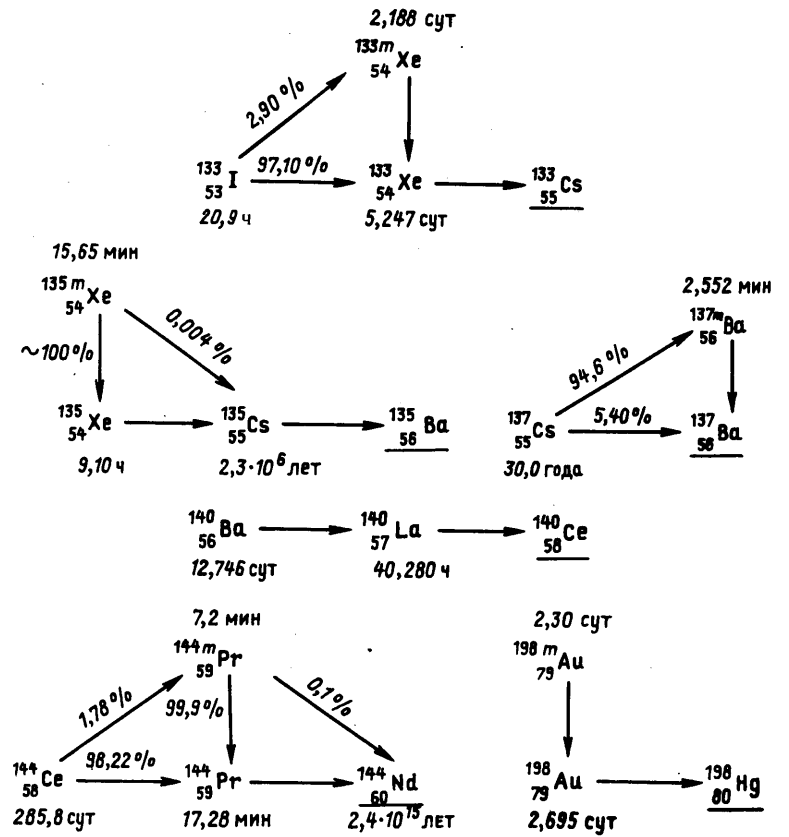
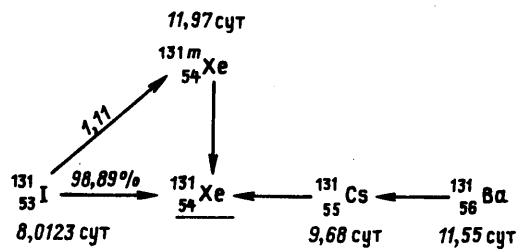
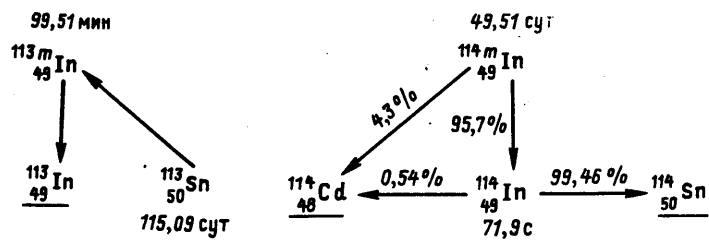
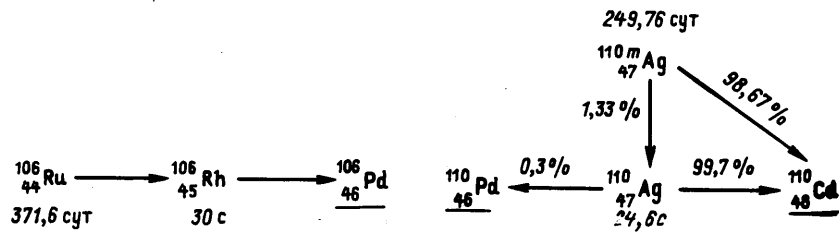
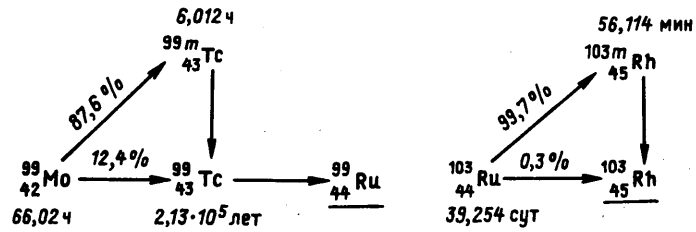
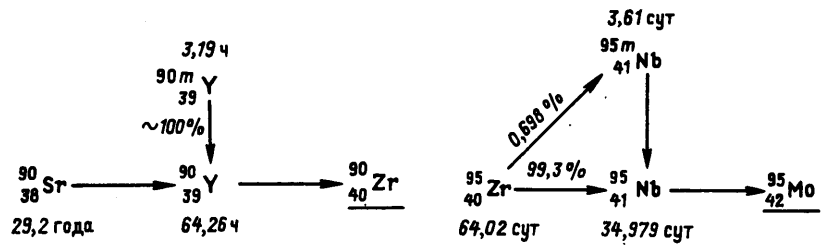
Номер энергетической группы	Энергетический диапазон ΔE_{β_i} в долях E_{β} или E_C	Доля полной энергии тормозного излучения	
		для β -частиц	для моноэнергетических электронов
1	0—0,1	0,435	0,269
2	0,1—0,2	0,258	0,205
3	0,2—0,3	0,152	0,158
4	0,3—0,4	0,083	0,121
5	0,4—0,5	0,043	0,09
6	0,5—0,6	0,02	0,065
7	0,6—0,7	$7 \cdot 10^{-3}$	0,045
8	0,7—0,8	$2 \cdot 10^{-3}$	0,028
9	0,8—0,9	$3 \cdot 10^{-4}$	0,015
10	0,9—1,0	0,00	0,004

§ 2.6. ЦЕПОЧКИ РАДИОАКТИВНОГО РАСПАДА

Ниже даны цепочки радиоактивного распада нуклидов [37], приведенных в табл. 2.2 и 2.4, первые дочерние продукты которых не являются стабильными, а также цепочка радиоактивного распада семейства радия до ^{210}Pb (RaD).

Цепочки радиоактивного распада





Используя цепочки распада, можно учесть в характеристиках нуклида излучение всех дочерних продуктов.

В изобарных цепочках, расположенных в порядке возрастания атомной массы, основные состояния нуклидов цепочки записаны в одну строку (по горизонтали), изомерные состояния нуклида — над основными состояниями (по вертикали). Стабильные нуклиды подчеркнуты. Возле химического символа радионуклида указаны периоды полураспада. Для ветвящихся цепочек под стрелками в процентах указаны коэффициенты ветвления.

Тип распада легко определить по изменению атомного номера по табл. 1.6.

§ 2.7. ХАРАКТЕРИСТИКИ ИСТОЧНИКОВ НЕЙТРОНОВ

Радионуклидные источники нейтронов. В этой группе нейтронных источников широко используются нейтроны, получаемые по реакциям (α, n), (γ, n), и спонтанного деления трансурановых элементов.

Источники нейтронов по реакции (α, n). Эти источники представляют собой однородную спрессованную смесь α -излучателя обычно с порошком металлического Be или В в герметической упаковке. Кроме Be и В иногда применяют легкие F или Li. Наибольший выход нейтронов достигается при использовании Be. В качестве α -излучателей чаще других источников применяют Po, Ra и Pu.

Отметим, что источники с использованием в качестве α -излучателя Ra дают нейтроны по реакции (α, n), вызываемой α -частицами как собственно ^{226}Ra , так и продуктов его распада. При точных измерениях с источниками Ra следует учитывать, что выход нейтронов источника после его изготовления (запайка ампулы) в течение 20—30 сут увеличивается за счет α -частиц накапливающихся основных дочерних продуктов распада. Затем в первые годы после изготовления увели-

Таблица 2.7

Основные характеристики некоторых (α, n)-источников
 $[Y_0, Y_0(E_0 < 2 \text{ МэВ})$ — полный выход нейтронов и выход нейтронов с энергией, меньшей 2 МэВ; $\bar{E}, E_{\text{макс}}$ — средняя и максимальная энергия нейтронов]

Источник	$T_{1/2}$	Выход нейтронов на 1 г радионуклида, нейтр./с	$\frac{Y_0(E_0 < 2 \text{ МэВ})}{Y_0} \times 100, \%$	Энергия нейтронов, МэВ		Число фотонов на 1 нейтрон
				$E_{\text{макс}}$	\bar{E}	
$\text{Ra}-\alpha-\text{Be}^{*1}$	1608 лет	$(1,2 \div 1,7) \times 10^{10}$	40	~13	3,2	~10 ⁴
$^{210}\text{Po}-\alpha-\text{Be}$	138,4 сут	10^{10}	20	10,9	4,2	~1
$^{239}\text{Pu}-\alpha-\text{Be}$	24 113 лет	$1,8 \cdot 10^5$	15—25	10,7	4,5	~3
$^{238}\text{Pu}-\alpha-\text{Be}$	87 лет	$2 \cdot 10^7$	25	11,1	3,9	Несколько
$^{210}\text{Po}-\alpha-\text{В}$	138,4 сут	—	—	6	2,7	—

*1 Ra в равновесии с основными дочерними продуктами распада.

*2 На 1 г ^{226}Ra .

чение выхода нейтронов составляет 0,5 % за год, что определяется периодом полураспада RaD, равным 21,8 года.

Размеры (α, n)-источников обычно невелики, и для большинства задач их можно считать точечными.

Для обеспечения более изотропного выхода нейтронов желательно использовать источники, близкие по форме к сферическим.

Основные характеристики наиболее широко используемых (α, n)-источников приведены в табл. 2.7 [42, 43].

Выход нейтронов в значительной степени зависит от качества изготовления источника и в основном от степени однородности смеси материалов мишени и источника α -частиц.

Энергетический спектр нейтронов (α, n)-источников непрерывный (рис. 2.2) [42].

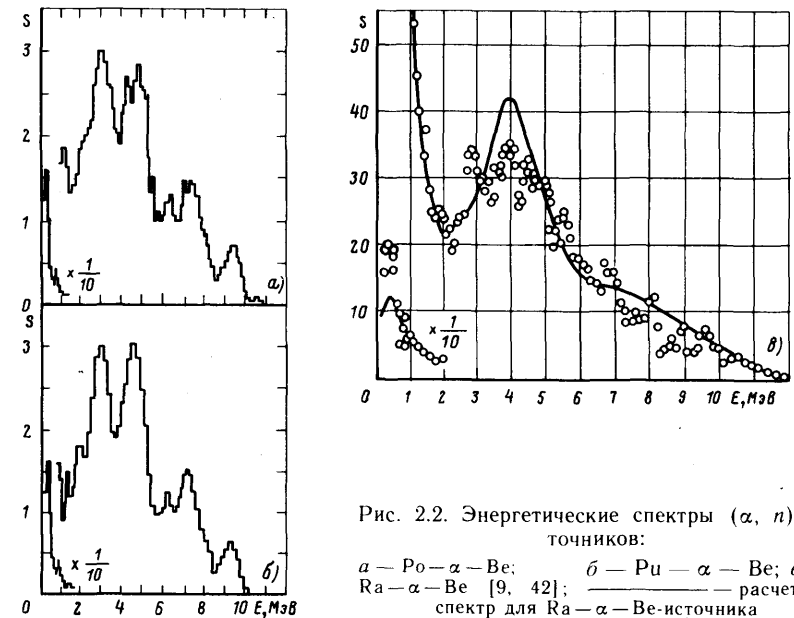


Рис. 2.2. Энергетические спектры (α, n)-источников:

a — $\text{Po}-\alpha-\text{Be}$; b — $\text{Pu}-\alpha-\text{Be}$; v — $\text{Ra}-\alpha-\text{Be}$ [9, 42]; ———— расчетный спектр для $\text{Ra}-\alpha-\text{Be}$ -источника

Энергетические спектры нейтронов $\text{Po}-\alpha-\text{Be}$ и $\text{Pu}-\alpha-\text{Be}$ -источников практически совпадают (рис. 2.2). Это объясняется тем, что энергии α -частиц Po и Pu совпадают с погрешностью около 0,15 МэВ.

В $\text{Po}-\alpha-\text{Be}$ -источнике возбужденное ядро ^{12}C испускает примерно 1 фотон/нейтр. с энергией 4,44 МэВ, а также фотоны с энергией 2,9 и 7,3 МэВ слабой интенсивности. Сам ^{210}Po испускает фотоны с энергией 0,803 МэВ с выходом $1,2 \cdot 10^{-5}$ фотон/расп.

В радиевом источнике доза сопутствующего γ -излучения определяется фотонами самого Ra в равновесии с основными дочерними продуктами распада.

Фотонейтронные источники. В фотонейтронных источниках используется (γ, n)-реакция, которая может проходить при энергии фотонов,

превышающей энергию связи нейтрона в ядре мишени. С этой точки зрения все мишени можно разделить на две группы: 1) бериллиевые и дейтериевые мишени со сравнительно низким порогом реакции 1,665 и 2,227 МэВ соответственно; 2) мишени из элементов, для которых энергия связи нейтрона в ядре выше примерно 6 МэВ.

Радионуклиды, как правило, не испускают фотоны с энергией, большей примерно 3 МэВ, поэтому мишени в нуклидных фотонейтронных источниках изготавливают только из Be и D (табл. 2.8). Бериллий обычно применяют в элементарном виде, дейтерий — в виде оксида дейтерия D₂O. Источниками фотонов могут служить радиоактивные нуклиды ²⁴Na, ⁵⁶Mn, ⁷²Ga, ⁸⁸Y, ¹¹⁶In, ¹²⁴Sb, ¹⁴⁰La, а также MsTh, ²²⁶Ra в равновесии с основными дочерними продуктами распада.

Таблица 2.8

Характеристики бериллиевых и дейтериевых фотонейтронных источников

Источник	$T_{1/2}$	E_{γ} , МэВ (n_{γ} , %) ^{*1}	E_n , МэВ	$\gamma \cdot 10^4$ нейтр./с ^{*2}
²⁴ Na + Be	14,956 ч	3,867 (0,06)	0,83	13
		2,754 (99,87)		
²⁴ Na + D ₂ O	14,956 ч	3,867 (0,06)	0,22	27
		2,754 (99,87)		
⁸⁸ Y + Be	106,61 сут	3,219 (0,01)	0,16	10
		2,734 (0,43)		
		1,836 (99,6)		
⁸⁸ Y + D ₂ O	106,61 сут	3,219 (0,01)	0,31 ^{*3}	0,3
		2,734 (0,43)		
		1,836 (99,6)		
¹²⁴ Sb + Be	60,20 сут	2,091 (5,61)	0,024	19
		1,691 (49)		
¹⁴⁰ La + Be	1,678 сут	2,522 (3,44)	0,62	0,3
		2,348 (0,86)		
¹⁴⁰ La + D ₂ O	1,678 сут	2,522 (3,44)	0,15	0,8
		2,348 (0,86)		
Ra + Be ^{*4}	1608 лет	2,448 (1,65)	0,6	3,0
		2,204 (5,3)		
		1,847 (2,2)		
		1,764 (16,6)		
Ra + D ₂ O ^{*4}	1608 лет	2,448 (1,65)	0,12	0,1

^{*1} Энергия E_{γ} и квантовый выход n_{γ} для основных фотонов, на которых идет реакция.

^{*2} Выход на 1 г мишени, находящейся на расстоянии 1 см от источника активностью 3,7 · 10¹⁰ Бк [1 Ки].

^{*3} Оценочное значение.

^{*4} Ra в равновесии с основными дочерними продуктами распада.

Источники с мишенью из Be или D₂O можно приготавливать в виде смеси этих материалов с γ -излучателем или в виде фотонного радионуклидного источника, помещенного внутри контейнера из Be или D₂O.

В этих источниках разброс нейтронов по энергиям бывает небольшой. Поэтому в многих практических задачах источники нейтронов по реакции (γ, n) могут считаться моноэнергетическими.

Выход нейтронов из (γ, n)-источников обычно меньше, чем из (α, n) источников, что объясняется меньшей величиной сечения (γ, n)-реакции.

Существенный недостаток фотонейтронных нуклидных источников — большой фон фотонного излучения.

Источник нейтронов спонтанного деления. Появление в последнее время в заметных количествах спонтанно делящихся трансурановых элементов Pu, Cm, Cf позволяет изготавливать на их основе источники нейтронов.

Особенно перспективными и удобными являются источники нейтронов на основе изотопа ²⁵²Cf с периодом полураспада относительно α -распада 2,64 года и с периодом полураспада относительно спонтанного деления 82 года. Этот источник обладает наибольшим удельным выходом нейтронов (около 2,5 · 10⁹ нейтр./с на 1 мг изотопа), что позволяет изготавливать практически невесомые и точечные источники.

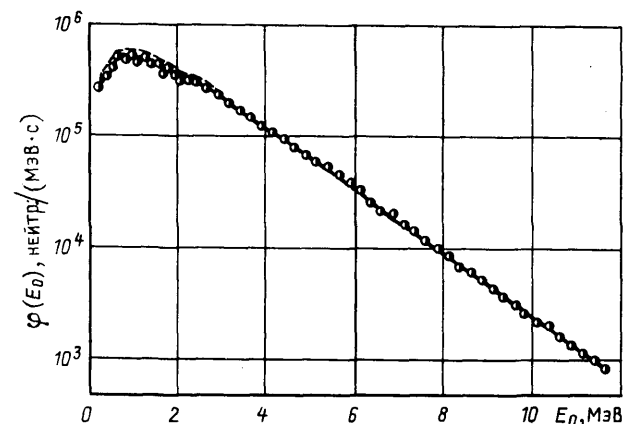


Рис. 2.3. Энергетический спектр нейтронов радионуклидного источника на основе ²⁵²Cf:

● — для источника в виде иглы диаметром 1,7 и высотой 36 мм; — — — — для того же источника в стальном цилиндре

Среднее число мгновенных нейтронов на деление у этого источника составляет 3,78 с малым выходом сопутствующего излучения (обычно не более трех фотонов на один испущенный нейтрон). Энергетический спектр нейтронов источника ²⁵²Cf (рис. 2.3) близок к спектру нейтронов деления и хорошо описывается зависимостью [42]

$$N(E_0) = \text{const} \sqrt{E_0} \exp(-E_0/T), \quad (2.44)$$

где T — температура спектра, $T = (1,40 \pm 0,02)$ МэВ.

Источник ²⁵²Cf удобен для проведения различных методических и калибровочных эталонных исследований. Малые размеры источника практически исключают возмущение исследуемой среды в задачах распространения нейтронов в веществе, а большая его мощность (до 10¹⁰ нейтр./с) позволяет рассматривать задачи с большой кратностью ослабления.

Выход, энергетическое распределение нейтронов и сопутствующее излучение зависят от чистоты исходного материала, способа приготовления, размеров и материала упаковки источников.

Источники нейтронов на основе ускорителей заряженных частиц. Нейтроны возникают в любых мишенях, которые облучаются тяжелыми заряженными частицами, если только рождение нейтрона не запрещено энергетически.

Для энергий ускоренных частиц, не превышающих 20—30 МэВ, наилучшими по выходу нейтронов являются мишени из легких элементов.

Важным преимуществом этих источников является возможность получения нейтронов с невысокой энергией. Для этих целей используют (p, n) и (d, n) -реакции на легких ядрах (рис. 2.4) [14, 43, 44].

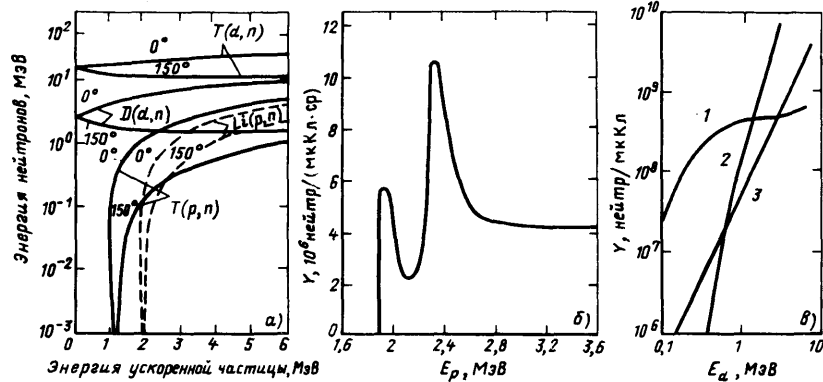


Рис. 2.4. Зависимость энергии нейтронов от энергии ускоренных протонов и дейтронов для углов вылета 0 и 150° (а), выход нейтронов Y в направлении «вперед» из металлической литиевой мишени «толщиной» 40 кэВ в зависимости от энергии протонов E_p (б), выход нейтронов Y из толстой мишени в зависимости от энергии дейтронов (в) для различных (d, n) -реакций:

1 — толстая тритийциркониевая мишень, реакция ${}^3\text{H}(d, n){}^4\text{He}$; 2 — реакция ${}^{10}\text{Be}(d, n){}^{10}\text{B}$; 3 — мишень из тяжелого льда, реакция ${}^2\text{H}(d, n){}^3\text{He}$

Примером использования указанных реакций могут служить широко распространенные реакции ускоренных до 1 МэВ дейтронов с мишенью из тяжелой воды для получения нейтронов с энергией 4 МэВ или ускоренных примерно до 15 кэВ дейтронов с мишенью из трития для получения нейтронов с энергией 14,9 МэВ при $\theta=0^\circ$.

Выше указывалось, что только на бериллиевой и дейтериевой мишенях по реакции (γ, n) можно получить радионуклидные фотонейтронные источники. Для получения фотонейтронов с использованием других мишеней, где энергия связи нейтрона в ядрах мишени обычно выше примерно 6 МэВ, необходимо более высокоэнергетическое фотонное излучение, которое можно получить на мишени электронных ускорителей соответствующих энергий.

На рис. 2.5 приведены выходы нейтронов из мишени различных материалов на электронных ускорителях, рассчитанные в предположе-

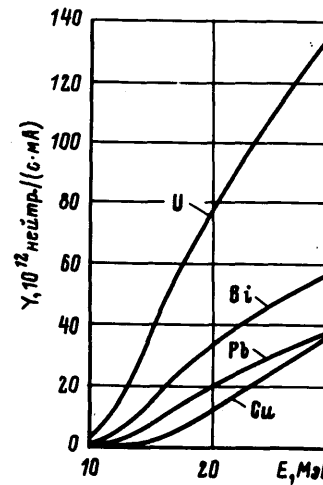


Рис. 2.5. Выходы нейтронов Y из различных мишеней в зависимости от энергии ускоренных электронов

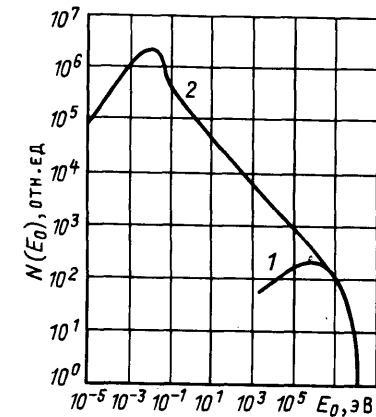


Рис. 2.6. Спектр нейтронов деления (1) и в активной зоне ядерного реактора на тепловых нейтронах (2)

нии, что электронный и фотонный пучки полностью поглощаются в мишени [45].

Источники нейтронов деления и синтеза ядер — наиболее мощные нейтронные источники. Например, через поверхность активной зоны мощного ядерного реактора проходит до $10^{17} - 10^{18}$ нейтр./с, что на много порядков больше мощности любого нейтронного источника, за исключением атомной бомбы.

Ядерный реактор как источник нейтронов деления [46, 47]. Нейтроны, сопровождающие процесс деления, подразделяют на мгновенные ($>99\%$) и запаздывающие нейтроны деления. Мгновенные нейтроны деления распределены по энергиям в широком интервале от нескольких десятков килоэлектрон-вольт примерно до 20 МэВ и образуются практически одновременно с делением ядра (рис. 2.6, табл. 2.9).

Спектр нейтронов деления ${}^{235}\text{U}$ тепловыми нейтронами Таблица 2.9

$E_0, \text{МэВ}$	$N(E_0)$	$\int_{E_0}^{\infty} N(E_0)dE_0$
0,05	0,1482	0,9950
0,20	0,2685	0,9622
0,40	0,3320	0,9012
0,60	0,3548	0,8321
0,80	0,3569	0,7606
1,0	0,3470	0,6901
1,5	0,2977	0,5280

Продолжение табл. 2.9

E_0 , МэВ	$N(E_0)$	$\int_{E_0}^{\infty} N(E_0)dE_0$
2,0	0,2388	0,3938
2,5	0,1842	0,2884
3,0	0,1382	0,2082
3,5	0,1018	0,1486
4,0	$7,379 \cdot 10^{-2}$	$1,050 \cdot 10^{-1}$
4,5	$5,285 \cdot 10^{-2}$	$7,362 \cdot 10^{-2}$
5,0	$3,746 \cdot 10^{-2}$	$5,124 \cdot 10^{-2}$
5,5	$2,633 \cdot 10^{-2}$	$3,545 \cdot 10^{-2}$
6,0	$1,837 \cdot 10^{-2}$	$2,439 \cdot 10^{-2}$
6,5	$1,276 \cdot 10^{-2}$	$1,666 \cdot 10^{-2}$
7,0	$8,772 \cdot 10^{-3}$	$1,138 \cdot 10^{-2}$
7,5	$6,000 \cdot 10^{-3}$	$7,710 \cdot 10^{-3}$
8,0	$4,104 \cdot 10^{-3}$	$5,221 \cdot 10^{-3}$
8,5	$2,784 \cdot 10^{-3}$	$3,512 \cdot 10^{-3}$
9,0	$1,888 \cdot 10^{-3}$	$2,364 \cdot 10^{-3}$
9,5	$1,282 \cdot 10^{-3}$	$1,583 \cdot 10^{-3}$
10,0	$8,562 \cdot 10^{-4}$	$1,058 \cdot 10^{-3}$
11,0	$3,837 \cdot 10^{-4}$	$4,686 \cdot 10^{-4}$
12,0	$1,702 \cdot 10^{-4}$	$2,058 \cdot 10^{-4}$
13,0	$7,478 \cdot 10^{-5}$	$8,968 \cdot 10^{-5}$
14,0	$3,260 \cdot 10^{-5}$	$3,883 \cdot 10^{-5}$
15,0	$1,411 \cdot 10^{-5}$	$1,669 \cdot 10^{-5}$
16,0	$6,070 \cdot 10^{-6}$	$7,130 \cdot 10^{-6}$
17,0	$2,590 \cdot 10^{-6}$	$3,000 \cdot 10^{-6}$

Энергетический спектр нейтронов деления ^{235}U тепловыми нейтронами может быть описан плавной функцией

$$N(E_0) = a \operatorname{sh} \sqrt{bE_0} \exp(-E_0/c), \quad (2.45)$$

где a, b, c — константы.

Наиболее точное выражение получается при использовании констант Крэнберга ($a=0,453$; $b=2,29$; $c=0,965$):

$$N(E_0) = 0,453 \operatorname{sh} \sqrt{2,29E_0} \exp(-E_0/0,965). \quad (2.46)$$

Для описания $N(E_0)$ приводятся в литературе также следующие формулы:

формула Уатта-Фэзера

$$N(E_0) = 0,484 \operatorname{sh} \sqrt{2E_0} \exp(-E_0); \quad (2.47)$$

экспоненциальная зависимость для энергий $4 \text{ МэВ} \leq E_0 \leq 14 \text{ МэВ}$

$$N(E_0) = 1,75 \exp(-0,776E_0); \quad (2.48)$$

формула Лос-Аламосской лаборатории

$$N(E_0) = 0,770 \sqrt{E_0} \exp(-0,776E_0). \quad (2.49)$$

В формулах (2.45) — (2.49) $N(E_0)$ — доля нейтронов, испущенных на интервал в 1 МэВ на 1 нейтрон, испущенный при делении, нейтр./ (МэВ·нейтр. деления); E_0 — энергия, МэВ. Таким образом, энергетические распределения нормированы следующим образом:

$$\int_0^{\infty} N(E_0) dE_0 = 1. \quad (2.50)$$

Формула (2.49) в области энергии $E_0 > 9 \text{ МэВ}$ дает завышенный результат.

Максимум энергетического распределения нейтронов приходится на интервал энергии 0,6—0,8 МэВ.

При расчете защиты небольшие изменения в спектре нейтронов деления, которые возникают при замене делящегося материала или при изменении энергии нейтронов по сравнению с делением ^{235}U на тепловых нейтронах, на практике можно не принимать во внимание.

Запаздывающие нейтроны (табл. 2.10) связаны с β -распадом тех осколков деления, энергия возбуждения дочерних продуктов которых превышает энергию связи нейтронов.

Таблица 2.10

Группы нейтронов	$T_{1/2}^*$, с	$E_{\text{н}}$, кэВ	Доля запаздывающих нейтронов при делении*2					
			^{232}Th	^{233}U	^{235}U	^{238}U	^{239}Pu	^{240}Pu
1	54,5	250	0,034	0,086	0,038	0,013	0,038	0,025
2	21,8	160	0,150	0,274	0,213	0,137	0,280	0,270
3	6,0	105	0,155	0,228	0,188	0,162	0,216	0,184
4	2,2	150	0,446	0,316	0,407	0,388	0,328	0,359
5	0,50	520	0,172	0,073	0,128	0,225	0,103	0,135
6	0,18		0,043	0,023	0,026	0,075	0,035	0,027

Общий выход:	^{232}Th	^{233}U	^{235}U	^{238}U	^{239}Pu	^{240}Pu
на одно деление	0,0496	0,0070	0,0165	0,0412	0,0063	0,0080
на нейтрон, испускаемый при делении	—	0,0029	0,0067	—	0,0021	—

*1 Приведенные $T_{1/2}$ характерны для деления ^{235}U . Различие периодов для различных делящихся нуклидов и энергий нейтронов, вызывающих деление, для практических целей несущественно.

*2 Выходы для каждой группы представлены в виде доли запаздывающих нейтронов в данной группе от общего количества запаздывающих нейтронов.

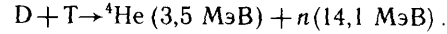
Отметим, что энергетическое распределение нейтронов в активной зоне реактора (рис. 2.6) не описывается во всем диапазоне энергий приведенными выше формулами (2.45) — (2.47), так как энергетическое распределение нейтронов в реакторе устанавливается в результате процессов взаимодействия нейтронов с ядрами активной зоны и отражателя. Поэтому спектр нейтронов в реакторе значительно мягче спектра нейтронов деления. Форма спектра определяется конкретной компоновкой активной зоны и отражателя данного реактора.

Однако при $E_0 \geq 3-4$ МэВ практически для всех типов реакторов спектр нейтронов можно аппроксимировать формулами (2.45) — (2.47). Отмеченное справедливо и для энергетических распределений нейтронов, формируемых в экспериментальных каналах и на их выходе.

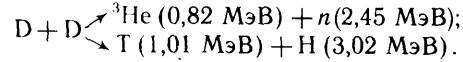
Источником нейтронов деления могут служить урановые мишени-конверторы, облучаемые потоком тепловых нейтронов.

Среднее число нейтронов на деление $\bar{\nu}$ при делении на тепловых нейтронах следующее: для ^{235}U $\bar{\nu} = 2,43 \pm 0,02$; для ^{233}U $\bar{\nu} = 2,50 \pm 0,01$; для ^{239}Pu $\bar{\nu} = 2,89 \pm 0,04$.

Термоядерный реактор как источник нейтронов. Основой для изучения возможности создания термоядерного реактора послужил дейтерий-тритиевый топливный цикл



Интересным представляется также топливный цикл



Указанные реакции приводят к образованию быстрых нейтронов, для которых проводят расчет защиты. Заметим, что если в активной зоне ядерного реактора доля нейтронов с энергией выше 10 МэВ составляет всего лишь 0,1 % (табл. 2.9), то источник нейтронов реактора синтеза по реакции $\text{D} + \text{T}$ можно считать близким к моноэнергетическому с энергией нейтронов 14,1 МэВ.

Нейтроны при ядерном и термоядерном взрывах [47]. При ядерном взрыве, использующем реакцию деления, образуется $2 \cdot 10^{23}$ нейтронов на 1 кт тротилового эквивалента. При термоядерном взрыве образуется приблизительно в 10 раз больше нейтронов при одинаковом тротиловом эквиваленте заряда.

Энергетическое распределение нейтронов, покидающих зону взрыва, не совпадает с начальным спектром, характерным для нейтронов, образующихся в результате реакции деления или синтеза. Оно заметно трансформируется при прохождении через конструктивные материалы и оболочку боеприпаса, так что для спектра нейтронов, покидающих зону взрыва, характерно обогащение нейтронами с низкой энергией.

Эти источники являются наиболее мощными источниками нейтронов. Так как при ядерном взрыве процесс выделения энергии и образования нейтронов происходит за время, значительно меньшее 10^{-6} с, подземный ядерный взрыв может использоваться как импульсный источник однократного действия для селекции нейтронов по времени пролета.

§ 2.8. ПРОДУКТЫ ДЕЛЕНИЯ ^{235}U И ^{238}U КАК ИСТОЧНИКИ γ -ИЗЛУЧЕНИЯ

В зависимости от времени кампании (время облучения в реакторе) T , времени выдержки t и мощности реактора продукты деления, образующиеся в ядерном реакторе, характеризуются обычно активностью, керма-эквивалентом и эффективным энергетическим составом γ -излучения (последний не зависит от мощности реактора). Методика расчета радиационных характеристик продуктов деления описана в работах [48—53].

В табл. 2.11—2.14 приведены результаты расчетов активностей и керма-эквивалентов продуктов деления ^{235}U тепловыми нейтронами и ^{238}U

Таблица 2.11

Активность продуктов деления ^{235}U тепловыми нейтронами, Бк, при постоянной скорости деления 1 дел./с в зависимости от времени выдержки t для различных кампаний T (времени облучения) [53]

$t, \text{с}$	Выдержка	Время кампании $T, \text{с}$						$3,17 \cdot 10^{17}$ лет	
		Время кампании T			Время кампании T				
		$1 \cdot 10^5$	$3 \cdot 10^5$	$1 \cdot 10^6$	$3 \cdot 10^6$	$1 \cdot 10^7$	$3 \cdot 10^7$		$1 \cdot 10^8$
0	0	4,72 + 0	4,98 + 0	5,23 + 0	5,44 + 0	5,65 + 0	5,81 + 0	5,95 + 0	4,81 + 1
$1 \cdot 10^1$	1 с	4,47 + 0	4,73 + 0	4,97 + 0	5,19 + 0	5,40 + 0	5,55 + 0	5,70 + 0	4,76 + 1
$1 \cdot 10^2$	10 с	3,69 + 0	3,94 + 0	4,19 + 0	4,40 + 0	4,61 + 0	4,77 + 0	4,91 + 0	4,53 + 1
$1 \cdot 10^3$	1,67 мин	2,62 + 0	2,88 + 0	3,12 + 0	3,33 + 0	3,54 + 0	3,69 + 0	3,82 + 0	3,89 + 1
$1 \cdot 10^4$	16,7 мин	1,64 + 0	1,89 + 0	2,14 + 0	2,35 + 0	2,56 + 0	2,70 + 0	2,82 + 0	3,56 + 1
$1 \cdot 10^5$	2,78 ч	7,30 - 1	9,68 - 1	1,21 + 0	1,42 + 0	1,63 + 0	1,77 + 0	1,88 + 0	3,11 + 1
$3 \cdot 10^4$	8,33 ч	4,33 - 1	6,43 - 1	8,77 - 1	1,08 + 0	1,29 + 0	1,43 + 0	1,54 + 0	2,81 + 1
$1 \cdot 10^5$	1,16 сут	1,78 - 1	3,28 - 1	5,35 - 1	7,32 - 1	9,33 - 1	1,07 + 0	1,17 + 0	2,26 + 1
$3 \cdot 10^5$	3,47 сут	6,10 - 2	1,45 - 1	3,01 - 1	4,77 - 1	6,69 - 1	8,00 - 1	8,89 - 1	1,68 + 1
$1 \cdot 10^6$	11,6 сут	1,91 - 2	5,22 - 2	1,35 - 1	2,62 - 1	4,28 - 1	5,48 - 1	6,27 - 1	1,17 + 1
$3 \cdot 10^6$	34,7 сут	5,97 - 3	1,73 - 2	5,16 - 2	1,21 - 1	2,42 - 1	3,41 - 1	4,10 - 1	7,22 + 0
$1 \cdot 10^7$	116 сут	1,52 - 3	4,51 - 3	1,44 - 2	3,86 - 2	9,20 - 2	1,49 - 1	2,04 - 1	2,47 + 0
$3 \cdot 10^7$	347 сут	2,58 - 4	7,70 - 4	2,52 - 3	7,15 - 3	2,03 - 2	4,43 - 2	8,09 - 2	9,28 - 1
$1 \cdot 10^8$	3,17 года	4,61 - 5	1,38 - 4	1,35 - 3	1,35 - 3	4,28 - 3	1,13 - 2	2,82 - 2	6,98 - 1
$3 \cdot 10^8$	9,51 года	1,63 - 5	4,90 - 5	1,63 - 4	4,87 - 4	1,61 - 3	4,72 - 3	1,49 - 2	5,41 - 1
$1 \cdot 10^9$	31,7 года	8,56 - 6	2,57 - 5	8,53 - 5	2,55 - 4	8,46 - 4	2,52 - 3	8,17 - 3	2,98 - 1

Таблица 2.12

Керма-эквивалент продуктов деления ^{235}U тепловыми нейтронами, нГр. м²/с, при постоянной скорости деления 1 дел./с в зависимости от времени выдержки t для различных кампаний T (времени облучения) [53]

t, c	Время кампании, T, c							
	$1 \cdot 10^5$	$3 \cdot 10^5$	$1 \cdot 10^6$	$3 \cdot 10^6$	$1 \cdot 10^7$	$3 \cdot 10^7$	$1 \cdot 10^8$	$1 \cdot 10^{25}$
	Время кампании T							
t	1,16 сут	3,47 сут	11,6 сут	34,7 сут	116 сут	347 сут	3,17 года	$3,17 \cdot 10^{17}$ лет
0	1,87-07	1,92-7	1,96-07	2,00-07	2,03-7	2,05-7	2,06-7	6,40-7
$1 \cdot 10^0$	1,73-07	1,79-7	1,83-07	1,87-07	1,90-7	1,92-7	1,93-7	6,26-7
$1 \cdot 10^1$	1,36-07	1,41-7	1,46-07	1,49-07	1,52-7	1,54-7	1,56-7	5,86-7
$1 \cdot 10^2$	9,15-08	9,67-8	1,01-07	1,05-07	1,08-7	1,10-7	1,11-7	5,33-7
$1 \cdot 10^3$	5,47-08	5,98-8	6,44-08	6,80-08	7,09-8	7,27-8	7,42-8	4,88-7
$1 \cdot 10^4$	1,91-08	2,38-8	2,83-08	3,19-08	3,48-8	3,65-8	3,81-8	4,33-7
$3 \cdot 10^4$	9,26-09	1,34-8	1,77-08	2,13-08	2,40-8	2,58-8	2,72-8	4,07-7
$1 \cdot 10^5$	3,55-09	6,36-9	1,01-08	1,35-08	1,63-8	1,80-8	1,92-8	3,65-7
$3 \cdot 10^5$	1,11-09	2,64-9	5,49-09	8,46-09	1,10-8	1,26-8	1,37-8	3,06-7
$1 \cdot 10^6$	3,48-10	9,46-10	2,40-09	4,42-09	6,57-9	8,00-9	8,79-9	2,22-7
$3 \cdot 10^6$	9,31-11	2,67-10	7,76-10	1,71-09	3,21-9	4,32-9	4,87-9	1,24-7
$1 \cdot 10^7$	1,85-11	5,48-11	1,75-10	4,71-10	1,11-9	1,62-9	1,97-9	4,34-8
$3 \cdot 10^7$	1,89-12	5,61-12	1,80-11	4,89-11	1,21-10	2,17-10	4,72-10	1,73-8
$1 \cdot 10^8$	1,06-13	3,18-13	1,06-12	3,27-12	1,20-11	4,39-11	1,85-10	9,11-9
$3 \cdot 10^8$	6,89-14	2,07-13	6,90-13	2,09-12	7,16-12	2,28-11	8,14-11	5,62-9
$1 \cdot 10^{25}$	4,08-14	1,22-13	4,08-13	1,22-12	4,08-12	1,22-11	4,01-11	2,59-9

Таблица 2.13
Активность продуктов деления ^{238}U нейтронами спектра деления, Бк, при постоянной скорости деления 1 дел./с в зависимости от времени выдержки t для различных кампаний T (времени облучения) [53]

t, c	Время кампании T, c							
	$1 \cdot 10^5$	$3 \cdot 10^5$	$1 \cdot 10^6$	$3 \cdot 10^6$	$1 \cdot 10^7$	$3 \cdot 10^7$	$1 \cdot 10^8$	$1 \cdot 10^{25}$
	Время кампании T							
t	1,16 сут	3,47 сут	11,6 сут	34,7 сут	116 сут	347 сут	3,17 года	$3,17 \cdot 10^{17}$ лет
0	5,76+0	6,05+0	6,31+0	6,52+0	6,72+0	6,85+0	6,93+0	7,52+0
$1 \cdot 10^0$	5,30+0	5,58+0	5,85+0	6,06+0	6,26+0	6,38+0	6,46+0	7,05+0
$1 \cdot 10^1$	4,09+0	4,37+0	4,64+0	4,85+0	5,05+0	5,17+0	5,25+0	5,84+0
$1 \cdot 10^2$	2,75+0	3,04+0	3,30+0	3,52+0	3,72+0	3,84+0	3,92+0	4,51+0
$1 \cdot 10^3$	1,65+0	1,94+0	2,20+0	2,41+0	2,61+0	2,73+0	2,81+0	3,40+0
$1 \cdot 10^4$	7,30-1	9,96-1	1,25+0	1,46+0	1,66+0	1,79+0	1,87+0	2,46+0
$3 \cdot 10^4$	4,46-1	6,80-1	9,27-1	1,13+0	1,33+0	1,46+0	1,53+0	2,13+0
$1 \cdot 10^5$	1,89-1	3,52-1	5,69-1	7,67-1	9,63-1	1,09+0	1,16+0	1,76+0
$3 \cdot 10^5$	6,56-2	1,55-1	3,16-1	4,92-1	6,80-1	8,00-1	8,78-1	1,47+0
$1 \cdot 10^6$	1,94-2	5,28-2	1,36-1	2,62-1	4,26-1	5,38-1	6,14-1	1,21+0
$3 \cdot 10^6$	5,94-3	1,72-2	5,14-2	1,21-1	2,38-1	3,33-1	4,05-1	9,95-1
$1 \cdot 10^7$	1,47-3	4,34-3	1,38-2	3,69-2	8,76-2	1,46-1	2,07-1	7,94-1
$3 \cdot 10^7$	2,64-4	7,88-4	2,58-3	7,39-3	2,14-2	4,85-2	9,01-2	6,70-1
$1 \cdot 10^8$	5,05-5	1,51-4	5,02-4	1,48-3	4,69-3	1,23-2	2,93-2	5,92-1
$3 \cdot 10^8$	1,31-5	3,94-5	1,31-4	3,93-4	1,30-3	3,82-3	1,20-2	5,47-1
$1 \cdot 10^9$	6,51-6	1,95-5	6,51-5	1,95-4	6,48-4	1,93-3	6,27-3	4,85-1

Таблица 2.14

Керма-эквивалент продуктов деления ^{238}U нейтронами спектра деления, $\text{нГр} \cdot \text{м}^2/\text{с}$, при постоянной скорости деления 1 дел./с в зависимости от времени выдержки t для различных кампаний T (времени облучения) [53]

$t, \text{с}$	Выдержка	Время кампании $T, \text{с}$									
		Время кампании T									
		$1 \cdot 10^5$	$3 \cdot 10^5$	$1 \cdot 10^6$	$3 \cdot 10^6$	$1 \cdot 10^7$	$3 \cdot 10^7$	$1 \cdot 10^8$	$1 \cdot 10^{25}$		
0	0	1,16 сут	3,47 сут	11,6 сут	34,7 сут	116 сут	347 сут	3,17 года	$3,17 \cdot 10^{17}$ лет		
$1 \cdot 10^0$	0	2,35—7	2,40—7	2,45—7	2,49—7	2,52—7	2,53—7	2,53—7	2,57—7		
$1 \cdot 10^1$	1 с	2,10—7	2,15—7	2,20—7	2,24—7	2,27—7	2,28—7	2,28—7	2,32—7		
$1 \cdot 10^2$	10 с	1,49—7	1,54—7	1,59—7	1,63—7	1,65—7	1,67—7	1,67—7	1,71—7		
$1 \cdot 10^3$	1,67 мин	9,35—8	9,89—8	1,04—7	1,07—7	1,10—7	1,11—7	1,12—7	1,15—7		
$1 \cdot 10^4$	16,7 мин	5,26—8	5,80—8	6,28—8	6,65—8	6,92—8	7,05—8	7,07—8	7,45—8		
$1 \cdot 10^5$	2,78 ч	1,81—8	2,31—8	2,78—8	3,15—8	3,41—8	3,54—8	3,57—8	3,95—8		
$3 \cdot 10^5$	8,33 ч	9,07—9	1,34—8	1,80—8	2,16—8	2,42—8	2,55—8	2,58—8	2,95—8		
$1 \cdot 10^6$	1,16 сут	3,58—9	6,55—9	1,06—8	1,40—8	1,66—8	1,79—8	1,82—8	2,19—8		
$3 \cdot 10^6$	3,47 сут	1,19—9	2,83—9	5,84—9	8,83—9	1,13—8	1,25—8	1,28—8	1,66—8		
$1 \cdot 10^7$	11,6 сут	3,63—10	9,81—10	2,46—9	4,48—9	6,53—9	7,69—9	7,95—9	1,17—8		
$3 \cdot 10^7$	34,7 сут	9,31—11	2,67—10	7,74—10	1,70—9	3,09—9	4,01—9	4,25—9	8,00—9		
$1 \cdot 10^8$	116 сут	1,71—11	5,07—11	1,61—10	4,29—10	9,91—10	1,42—9	1,59—9	5,34—9		
$3 \cdot 10^8$	347 сут	1,74—12	5,17—12	1,66—11	4,54—11	1,14—10	1,99—10	3,14—10	4,03—9		
$1 \cdot 10^9$	3,17 года	1,45—13	4,34—13	1,44—12	4,27—12	1,38—11	3,78—11	1,03—10	3,76—9		
$3 \cdot 10^9$	9,51 года	6,86—14	2,06—13	6,85—13	2,05—12	6,82—12	2,02—11	6,53—11	3,58—9		
$1 \cdot 10^9$	31,7 года	3,96—14	1,19—13	3,96—13	1,19—12	3,94—12	1,17—11	3,82—11	3,22—9		

нейтронами спектра деления при делении однокомпонентного топлива в гипотетическом реакторе, любезно предоставленные авторами работы [53]. Данные этих таблиц приведены для постоянной скорости деления в течение времени кампании, равной 1 делению в 1 с. В расчетах керма-эквивалентов продуктов деления учтены фотоны и с энергией $E < 30$ кэВ. Время облучения $1 \cdot 10^{25}$ с выбрано как время бесконечной кампании.

Переход к определению характеристик для тепловой мощности реактора 1 кВт может быть осуществлен, если помнить, что тепловой мощности 1 кВт соответствует $3,12 \cdot 10^{13}$ дел./с. Последнее соотношение предполагает, что при 1 акте деления выделяется энергия 200 МэВ.

Энергетический спектр γ -излучения продуктов деления сложный, что обусловлено присутствием большого количества радионуклидов. В литературе спектр приводится в различном разбиении на энергетические группы: на 5 групп [48, 49], 7 групп [51, 52], 15 групп [53].

Данные табл. 2.11—2.14 могут быть использованы для первых оценок. Подробные радиационные характеристики облученного ядерного топлива приводятся в [48—53]. Следует обратить внимание на то, что для сопоставимых интегральных характеристик активности продуктов деления данные работы 1958 г. [48] и 1983 г. [52] отличаются менее чем на 10 %.

§ 2.9. КЛАССИФИКАЦИЯ ЗАЩИТ

Для описания защиты от излучений должны быть указаны следующие ее характеристики.

1. *Назначение*: биологическая (обеспечивающая допустимый уровень облучения обслуживающего установку персонала), радиационная (обеспечивающая допустимый уровень радиационных повреждений конструкционных и защитных материалов), тепловая (обеспечивающая допустимый уровень радиационного энерговыделения и температурного распределения в конструкционных и защитных материалах).

2. *Тип*: сплошная (целиком окружающая источник излучения), раздельная (наиболее мощные источники окружает первичная защита, а между первичной и вторичной защитами также имеются источники излучения), теньевая (защита устанавливается между источником излучения и защищаемой областью, размеры которой ограничиваются «тенью», «отбрасываемой» защитой), частичная (ослабленная для областей ограниченного доступа персонала).

3. *Компоновка*: гомогенная, гетерогенная.

4. *Форма внешней поверхности*: плоская, цилиндрическая, сферическая и т. п.

5. *Геометрия*: бесконечная (рис. 2.7, а), полубесконечная с детектором D на границе среды и источником S в среде (рис. 2.7, б), полубесконечная с источником S на границе среды и детектором D в среде (рис. 2.7, в), барьерная (рис. 2.7, г), ограниченная (рис. 2.7, д).

Защиту можно физически считать бесконечной, если любое окружение выделенной защитной среды любым дополнительным материалом не влияет на показания детектора, т. е. вероятность любой частицы, рассеянной за пределами выделенной среды, быть зарегистрированной детектором практически равна нулю. Полубесконечная среда с детектором на границе образуется из бесконечной, если отсечь плоскостью AA (рис. 2.7, а) заднее по отношению к детектору полупространство;

Глава 3 ПРЕДЕЛЬНО ДОПУСТИМЫЕ УРОВНИ ИОНИЗИРУЮЩИХ ИЗЛУЧЕНИЙ

§ 3.1. ПРИНЦИПЫ НОРМИРОВАНИЯ РАДИАЦИОННОГО ОБЛУЧЕНИЯ

Нежелательные радиационные эффекты воздействия облучения на организм человека, от которых требуется защита, условно делятся на *соматические* («сома» по гречески «тело») и *генетические* (наследственные) [54]. Соматические эффекты проявляются непосредственно у самого облученного, а генетические — у его потомства.

К соматическим эффектам условно относятся непосредственные ранние эффекты облучения (острая или хроническая лучевая болезнь и локальные лучевые поражения), которые проявляются в течение нескольких недель, и его отдаленные последствия (сокращение продолжительности жизни, возникновение опухолей и др.), проявляющиеся только через много месяцев или лет после облучения у самого облученного лица. К генетическим относятся последствия облучения генома зародышевых клеток в потомстве облученных особей (врожденные уродства и нарушения у потомков облученных, передающиеся по наследству).

В основе современных концепций нормирования радиационного облучения лежит принцип ограничения дозы на человека [55, 56]. При этом исходят из того, что меры радиационной безопасности, необходимые для защиты как персонала, работающего с источниками ионизирующих излучений, так и населения, будут достаточны, чтобы одновременно защитить и все другие виды живых организмов, хотя и необязательно все особи этих видов. Другими словами, предполагается, что надежная защита человека от облучения гарантирует защиту для отдельных биоценозов*¹ и биосферы в целом. Такой принцип нормирования радиационного воздействия называют *радиационно-гигиеническим*.

Нормирование в нашей стране осуществлено исходя из следующих *основных принципов радиационной безопасности* [10]: 1) не превышения установленного нормами основного дозового предела; 2) исключения всякого необоснованного облучения; 3) снижения дозы облучения до возможно низкого уровня.

Сегодня в условиях широкого использования ядерной энергетики, частого применения в различных областях разнообразных источников ионизирующего излучения, повышения радиационного фона в глобальных масштабах, проявления синергетического действия*² при комбинированном воздействии разных агентов на организм становится актуальной задача разработки принципов охраны здоровья человека и окружающей его среды с учетом воздействия ионизирующих излучений

*¹ Биоценоз — совокупность растений, животных и микроорганизмов, населяющих данный участок суши или водоема.

*² Воздействие, когда комбинированный эффект двух агентов, например радиационного и химического, выше, чем суммарное действие от каждого из них определенное в отдельности.

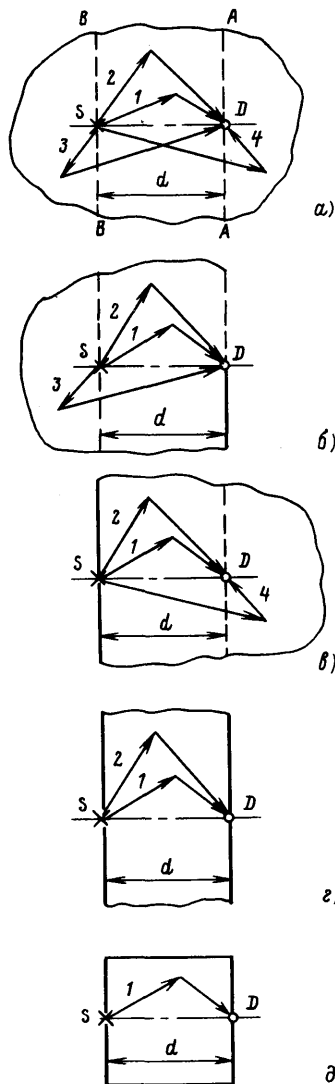


Рис. 2.7. Геометрия защит и типичные траектории рассеянных в среде частиц

полубесконечная среда с источником на границе среды образуется из бесконечной (рис. 2.7, а), если отсечь плоскостью *BB* задние по отношению к источнику полупространства.

Если отсечь задние полупространства по отношению к источнику и детектору параллельными плоскостями *AA* и *BB*, то получится барьерная геометрия защиты (рис. 2.7, б).

Выделение в защите барьерной геометрии лишь части среды, например цилиндра, на оси которого с противоположных сторон находятся источник и детектор, приводит к ограниченной защите. Под ограниченной понимается среда, у которой хотя бы один из поперечных размеров (размер в плоскости, перпендикулярной прямой источник — детектор) не может быть принят за бесконечный.

Зависимость показаний детектора от геометрии защит легко понять из рис. 2.7, где даны типичные траектории рассеянных частиц для различных геометрий при постоянной толщине среды *d* между источником *S* и детектором *D*. Для бесконечной геометрии регистрируются рассеянные в области защиты между источником и детектором частицы типов 1 и 2, а также частицы типа 3, рассеянные в области заднего полупространства защиты по отношению к источнику, и частицы типа 4, рассеянные в области заднего полупространства защиты по отношению к детектору. При переходе к другим геометриям будет регистрироваться меньшее число рассеянных частиц: в полубесконечной геометрии не регистрируются частицы типа 3 или 4, в барьерной — частицы типов 2, 3 и 4. Число регистрируемых нерассеянных частиц во всех случаях будет одинаковым.

Следовательно, максимальным будет показание детектора при измерении в условиях бесконечной геометрии, несколько меньшим — в полубесконечной среде, еще меньшим — в барьерной геометрии и минимальным — в ограниченной среде.

на объекты природной среды (животные, растения, микроорганизмы). Таким образом, дополнительно к радиационно-гигиеническому принципу нормирования следует добавить *экологический принцип* [55]. Основная задача такого нормирования — охрана биологических ресурсов планеты, сохранение генофонда живых организмов в биосфере Земли, обеспечение среды обитания человека, необходимой для его нормального существования. Поэтому необходимо накопление экспериментального и натурного материала в области радиоэкологии для получения достаточного объема сведений для экологического нормирования.

Таким образом, принимая принципы радиационно-гигиенического нормирования как основного при обеспечении радиационной безопасности, следует признать целесообразность их дополнения в дальнейшем экологическими критериями, чтобы гарантировать охрану природной среды от радиационных воздействий при любых видах использования источников ионизирующих излучений.

§ 3.2. ФОНОВОЕ ОБЛУЧЕНИЕ ЧЕЛОВЕКА

Фоновое облучение человека состоит из облучения *естественными источниками и искусственными источниками* [57—61].

Первый компонент фона, в свою очередь, имеет две составляющие: *естественный фон и техногенный радиационный фон от естественных радионуклидов*. Естественный фон ионизирующего излучения обусловлен космическим излучением и излучением естественного распределенного в природе радиоактивных веществ (радиоактивные вещества в горных породах, почвах, атмосфере, а также радионуклиды, инкорпорированные в тканях человека). Естественный фон обуславливается внешним и внутренним облучением: внешним за счет воздействия на организм излучения от внешних по отношению к нему источников (космическое излучение и естественные радионуклиды в горных породах, почве, атмосфере и др.) и внутренним за счет воздействия на организм излучений естественных радионуклидов, находящихся в организме (^{40}K и радионуклиды семейства U и Th, поступающие в организм с воздухом, пищей и водой).

Уровни естественного фона для определенного места практически не изменяются. Однако от района к району они могут существенно различаться. Доза естественного фона зависит от таких факторов: от высоты над уровнем моря, от количества и вида радионуклидов в горных породах и почве, количества радионуклидов, которые поступают в организм человека с воздухом, пищей и водой и т. д.

Изменение человеком окружающей среды и его деятельность могут увеличить дозы «нормального» облучения за счет естественных источников. Примеры такой деятельности — добыча полезных ископаемых, использование строительных материалов минерального происхождения в домостроении и минеральных удобрений, содержащих повышенное количество радионуклидов уранового и ториевого рядов, сжигание ископаемого топлива, в частности угля, приводящее к выбросу естественных радионуклидов (^{226}Ra , ^{228}Ra , ^{232}Th и др.). А такой фактор, как проживание в доме, часто приводит к повышению облучения, вызванному накоплением газообразных радионуклидов и их продуктов распада при недостаточной скорости вентиляции. Так появилась новая со-

ставляющая, обусловленная естественными источниками, — техногенный радиационный фон от естественных радионуклидов.

Наряду с естественными источниками излучения важную роль в формировании дозового облучения играют искусственные источники, связанные главным образом с развитием научно-технического процесса. Это облучение персонала и населения в медицине при рентгено- и радиодиагностике, терапии и фармакологическом использовании радионуклидов, от всего цикла атомной индустрии, включая АЭС, от испытаний

Таблица 3.1

Средние годовые индивидуальные эффективные эквивалентные дозы облучения H_E и риск появления злокачественных опухолей с летальным исходом R_1 и наследственных нарушений в первых двух поколениях R_2 у населения СССР в результате облучения на уровне 1980 и 1981 гг. [57]

Компонент фона	Источник облучения	H_E , мЗв	R_1 , 10^{-6} 1/чел.-год	R_2 , 10^{-6} 1/чел.-год	
Естественные источники					
Естественный фон	Космическое излучение и излучение естественных распределенных природных радиоактивных веществ	1,00	12,5	3,6	
	Техногенный радиационный фон от естественных радионуклидов	Строительные материалы	1,05	17,0	2,0
		Угольные электростанции суммарной мощностью 76 ГВт (эл.)	$2,0 \cdot 10^{-3}$	$1,9 \cdot 10^{-2}$	$2,2 \cdot 10^{-3}$
	Удобрения	$1,36 \cdot 10^{-1}$	$1,4 \cdot 10^{-1}$	$3,4 \cdot 10^{-1}$	
Искусственные источники					
Искусственный фон	Рентгенодиагностическое облучение в медицине	1,40	19,0*	1,4	
	Глобальные радиоактивные выпадения от испытательных взрывов ядерного оружия	$2,3 \cdot 10^{-2}$	$2,4 \cdot 10^{-1}$	$6,1 \cdot 10^{-2}$	
	АЭС суммарной мощностью 12 ГВт (эл.)	$1,7 \cdot 10^{-1}$	$1,6 \cdot 10^{-2}$	$5,0 \cdot 10^{-1}$	
Остальные компоненты		$1,6 \cdot 10^{-3}$	$1,6 \cdot 10^{-2}$	$4,4 \cdot 10^{-3}$	
Полное фоновое облучение		3,50	48,8	7,07	

* Ведущий фактор летальных исходов — злокачественные опухоли легких

ядерного оружия и т. п. Наибольший вклад среди источников искусственного фона принадлежит рентгенодиагностическому облучению в медицине, за счет которого создается годовая эффективная эквивалентная доза 1,40 мЗв. Облучение населения за счет глобальных радиоактивных выпадений составляет примерно 2 % облучения, формируемого естественным фоном. Эксплуатация АЭС при нормальных режимах обуславливает крайне низкие дозы облучения населения, значения которых намного меньше флуктуаций естественного фона.

В табл. 3.1 представлена сводка данных, характеризующих средние годовые индивидуальные эффективные эквивалентные дозы облучения населения СССР за счет фонового облучения в 1980—81 гг.

Таким образом, средняя для населения годовая индивидуальная эффективная эквивалентная доза за счет всех источников фонового облучения $H_E = 3,50$ мЗв, из них за счет естественного фона 1,00 мЗв, за счет использования строительных материалов, содержащих естественные радионуклиды, 1,05 мЗв, за счет рентгенодиагностического облучения в медицине 1,40 мЗв.

В табл. 3.1 приведены также риски появления злокачественных опухолей с летальным исходом и наследственных нарушений за счет различных компонентов фонового облучения. Анализ этих данных показывает, что на 1 млн. человек населения естественный фон может быть причиной 12,5 случаев смерти в год от злокачественных опухолей, использование строительных материалов с естественными радионуклидами — 17 случаев, рентгенодиагностика — 19 случаев. В расчете на все население СССР в результате воздействия на население всех компонентов фонового облучения (без производственного облучения) можно ожидать от злокачественных опухолей примерно 13 000 смертей в год (против 300 000 случаев смерти от спонтанного фона), а также немногим более 2000 наследственных дефектов в первых двух поколениях его потомков. Обратим внимание на то, что выбросы существующих АЭС на онкологическую и наследственную заболеваемость практически никакого влияния не оказывают.

§ 3.3. КАТЕГОРИИ ОБЛУЧАЕМЫХ ЛИЦ И ГРУППЫ КРИТИЧЕСКИХ ОРГАНОВ

Основным документом, регламентирующим уровни воздействия ионизирующих излучений, являются «Нормы радиационной безопасности НРБ-76/87» [10]. Основные требования по обеспечению радиационной безопасности регламентируются «Основными санитарными правилами работы с радиоактивными веществами и другими источниками ионизирующих излучений ОСП-72/87» [10]*.

НРБ-76/87 устанавливают следующие категории облучаемых лиц:

Категория А — персонал (профессиональные работники) — лица, которые постоянно или временно работают непосредственно с источниками ионизирующих излучений.

Категория Б — ограниченная часть населения — лица, которые не работают непосредственно с источниками излучения, но по условиям проживания или размещения рабочих мест могут подвергаться воз-

* Основные нормативные документы периодически пересматриваются, пользоваться следует официальными действующими в настоящее время документами.

действию радиоактивных веществ и других источников излучения, применяемых в учреждениях и (или) удаляемых во внешнюю среду. Уровень облучения лиц категории Б определяется по критической группе*.

Категория В — население области, края, республики, страны.

Как отмечалось выше, различные органы и ткани тела человека обладают разной радиочувствительностью. Критическим органом называется орган, ткань, часть тела или все тело, облучение которого в данных условиях причиняет наибольший ущерб здоровью данного лица или его потомства.

В порядке убывания радиочувствительности устанавливаются следующие три группы критических органов:

I группа — все тело, гонады, красный костный мозг;

II группа — мышцы, щитовидная железа, жировая ткань, печень, почки, селезенка, желудочно-кишечный тракт, легкие, хрусталики глаз и другие органы, за исключением тех, которые относятся к I и III группам;

III группа — кожный покров, костная ткань, кисти, предплечья, голени и стопы.

§ 3.4. ДОЗОВЫЕ ПРЕДЕЛЫ ОБЛУЧЕНИЯ И ДОПУСТИМЫЕ УРОВНИ

Для каждой категории облучаемых лиц устанавливаются два класса нормативов: *основные дозовые пределы и допустимые уровни*, соответствующие основным дозовым пределам.

В качестве основных дозовых пределов для лиц категории А устанавливается *предельно допустимая доза за календарный год*, для лиц категории Б — *предел дозы за календарный год*. Основные дозовые пределы устанавливаются для индивидуальной максимальной эквивалентной дозы в критическом органе.

Под предельно допустимой дозой ПДД (табл. 3.2) понимается наибольшее значение индивидуальной эквивалентной дозы за календарный год, при котором равномерное облучение в течение 50 лет не может вызвать в состоянии здоровья персонала (категория А) неблагоприятных изменений, обнаруживаемых современными методами.

Таблица 3.2.

Основные дозовые пределы суммарного внешнего и внутреннего облучения для различных групп критических органов за календарный год, мЗв/год

Основные дозовые пределы	Группы критических органов		
	I	II	III
Предельно допустимая доза для категории А (ПДД)	50	150	300
Предел дозы для категории Б (ПД)	5	15	30

* Критическая группа — небольшая по численности группа лиц категории Б, однородная по условиям жизни, возрасту, полу или другим факторам, которая подвергается наибольшему радиационному воздействию в пределах учреждения, его санитарно-защитной зоны или зоны наблюдения.

Под пределом дозы ПД (табл. 3.2) понимается предельная эквивалентная доза за год для ограниченной части населения (категория Б). Предел дозы ПД — наибольшее среднее значение индивидуальной эквивалентной дозы за календарный год у критической группы лиц, при котором равномерное облучение в течение 70 лет не может вызвать в состоянии здоровья неблагоприятных изменений, обнаруживаемых современными методами. Предел дозы контролируется по мощности эквивалентной дозы внешнего излучения на территории и в помещениях и по уровню радиоактивных выбросов и радиоактивного загрязнения объектов внешней среды.

Заметим, что приведенные дозовые пределы не включают дозу, получаемую пациентом при медицинском обследовании и лечении, и дозу обусловленную естественным фоновым облучением.

Таким образом, максимальная эквивалентная доза, накопленная в критическом органе за время T лет с начала профессиональной работы, не должна превышать значения

$$H \leq \text{ПДД} \cdot T, \quad (3.1)$$

где ПДД — годовая предельно допустимая эквивалентная доза в тех же единицах, что и H .

Распределение дозы облучения в течение календарного года не регламентируется, за исключением женщин в возрасте до 40 лет, отнесенных к категории А. В последнем случае доза на область таза не должна превышать 10 мЗв за любые 2 месяца.

Принято считать, что персонал (категория А) работает 1700 ч в году (имеет 4—6-недельный отпуск) и имеет 36-часовую рабочую неделю. Тогда предельно допустимая мощность дозы ДМД_А при равномерном

Таблица 3.3

Мощность эквивалентной дозы H , используемая при проектировании защиты от внешнего ионизирующего излучения

Категория облучаемых лиц	Продолжительность облучения, ч/год	Назначение помещений и территорий	Проектная мощность дозы, мкЗв/ч
Категория А	1700	Помещения постоянного пребывания персонала	14,7
	850	Помещения, в которых персонал пребывает не более половины рабочего времени	29,4
Категория Б	2000	Помещения учреждения и территория санитарно-защитной зоны ¹ , где находятся лица, относящиеся к категории Б	1,2
	8800	Любые помещения (в том числе жилые) и территория в пределах зоны наблюдения ²	0,3

¹ Санитарно-защитная зона — территория вокруг учреждения или источника радиоактивного выброса или сброса, на которой уровень облучения людей в условиях нормальной эксплуатации учреждения может превысить ПД. В этой зоне устанавливается режим ограничений и проводится радиационный контроль.

² Зона наблюдения — территория, где возможно влияние радиоактивных сбросов и выбросов учреждения и где облучение проживающего населения может достигать установленного ПД. В зоне наблюдения проводится радиационный контроль.

Таблица 3.4

Допустимые концентрации ДК отдельных радионуклидов в воздухе рабочей зоны ДК_А для категории А, в атмосферном воздухе и воде ДК_Б для категории Б и минимально значимая активность на рабочем месте МЗА [10]

Радионуклид	ДК радионуклида										МЗА		
	в воздухе рабочей зоны ДК _А			для категории Б ДК _Б в атмосферном воздухе			в воде				МБк	мкКи	
	Бк/м ³	Ки/л ¹	Ки/л ²	Бк/м ³	Ки/л	Бк/м ³	Ки/л	Бк/м ³	Ки/л	Ки/л			
											Бк/м ³	Ки/л	Ки/л
Тритий-3 (газ ТН, ТД, Т ₂)	2,2 · 10 ⁹	6,0 · 10 ⁻⁵	2,0 · 10 ⁻⁶	7,4 · 10 ⁷	2,0 · 10 ⁻⁶	—	—	—	—	—	—	—	—
Тритий-3 (окись ТНО, ТДО, Т ₂ О)	3,7 · 10 ⁵	1,0 · 10 ⁻⁸	3,0 · 10 ⁻¹⁰	1,1 · 10 ⁴	3,0 · 10 ⁻¹⁰	1,5 · 10 ⁸	4,0 · 10 ⁻⁶	—	—	—	3,7	100	100
Бериллий-7	4,4 · 10 ⁴	1,2 · 10 ⁻⁹	4,1 · 10 ⁻¹¹	1,5 · 10 ³	4,1 · 10 ⁻¹¹	6,7 · 10 ⁷	1,8 · 10 ⁻⁶	—	—	—	3,7	100	100
Углерод-14	1,3 · 10 ⁵	3,5 · 10 ⁻⁹	1,2 · 10 ⁻¹⁰	4,4 · 10 ³	1,2 · 10 ⁻¹⁰	3,0 · 10 ⁷	8,2 · 10 ⁻⁷	—	—	—	3,7	100	100
Натрий-22	3,1 · 10 ²	8,4 · 10 ⁻¹²	2,9 · 10 ⁻¹³	1,1 · 10 ¹	2,9 · 10 ⁻¹³	1,1 · 10 ⁶	3,0 · 10 ⁻⁸	—	—	—	0,37	10	10
Натрий-24	5,2 · 10 ³	1,4 · 10 ⁻¹⁰	4,9 · 10 ⁻¹²	1,8 · 10 ²	4,9 · 10 ⁻¹²	1,0 · 10 ⁶	2,8 · 10 ⁻⁸	—	—	—	0,37	10	10
Фосфор-32	2,7 · 10 ³	7,2 · 10 ⁻¹¹	2,4 · 10 ⁻¹²	8,9 · 10 ¹	2,4 · 10 ⁻¹²	7,0 · 10 ⁵	1,9 · 10 ⁻⁸	—	—	—	0,37	10	10
Сера-35	9,2 · 10 ³	2,5 · 10 ⁻¹⁰	8,6 · 10 ⁻¹²	3,2 · 10 ²	8,6 · 10 ⁻¹²	2,3 · 10 ⁵	6,3 · 10 ⁻⁸	—	—	—	0,37	10	10
Калий-42	4,1 · 10 ³	1,1 · 10 ⁻¹⁰	3,7 · 10 ⁻¹²	1,4 · 10 ²	3,7 · 10 ⁻¹²	7,4 · 10 ⁵	2,0 · 10 ⁻⁸	—	—	—	0,37	10	10
Хром-51	8,1 · 10 ⁴	2,2 · 10 ⁻⁹	7,7 · 10 ⁻¹¹	2,8 · 10 ³	7,7 · 10 ⁻¹¹	5,6 · 10 ⁷	1,5 · 10 ⁻⁶	—	—	—	3,7	100	100
Марганец-52	5,2 · 10 ³	1,4 · 10 ⁻¹⁰	4,8 · 10 ⁻¹²	1,8 · 10 ²	4,8 · 10 ⁻¹²	1,1 · 10 ⁶	3,0 · 10 ⁻⁸	—	—	—	0,37	10	10
Марганец-54	1,3 · 10 ³	3,6 · 10 ⁻¹¹	1,2 · 10 ⁻¹²	4,4 · 10 ¹	1,2 · 10 ⁻¹²	4,4 · 10 ⁶	1,2 · 10 ⁻⁷	—	—	—	0,37	10	10
Марганец-56	1,9 · 10 ⁴	5,2 · 10 ⁻¹⁰	3,7 · 10 ⁻¹¹	6,7 · 10 ²	3,7 · 10 ⁻¹¹	3,7 · 10 ⁶	1,0 · 10 ⁻⁷	—	—	—	0,37	10	10
Железо-59	1,9 · 10 ³	5,2 · 10 ⁻¹¹	1,8 · 10 ⁻¹²	6,7 · 10 ¹	1,8 · 10 ⁻¹²	2,0 · 10 ⁶	5,3 · 10 ⁻⁸	—	—	—	0,37	10	10
Кобальт-57	5,9 · 10 ³	1,6 · 10 ⁻¹⁰	5,5 · 10 ⁻¹²	2,0 · 10 ²	5,5 · 10 ⁻¹²	1,4 · 10 ⁷	3,8 · 10 ⁻⁷	—	—	—	0,37	10	10
Кобальт-58m	3,2 · 10 ⁵	8,8 · 10 ⁻⁹	2,9 · 10 ⁻¹⁰	1,1 · 10 ⁴	2,9 · 10 ⁻¹⁰	7,4 · 10 ⁷	2,0 · 10 ⁻⁶	—	—	—	0,37	10	10
Кобальт-58	2,1 · 10 ³	5,6 · 10 ⁻¹¹	1,9 · 10 ⁻¹²	7,0 · 10 ¹	1,9 · 10 ⁻¹²	3,3 · 10 ⁶	9,0 · 10 ⁻⁸	—	—	—	0,37	10	10
Кобальт-60	3,2 · 10 ⁴	8,8 · 10 ⁻¹²	3,0 · 10 ⁻¹³	1,1 · 10 ³	3,0 · 10 ⁻¹³	1,3 · 10 ⁶	3,5 · 10 ⁻⁸	—	—	—	0,37	10	100
Мель-64	3,7 · 10 ⁴	1,1 · 10 ⁻⁹	3,6 · 10 ⁻¹¹	1,3 · 10 ³	3,6 · 10 ⁻¹¹	7,8 · 10 ⁶	2,1 · 10 ⁻⁷	—	—	—	3,7	100	100
Цинк-65	2,2 · 10 ³	6,0 · 10 ⁻¹¹	2,0 · 10 ⁻¹²	7,4 · 10 ¹	2,0 · 10 ⁻¹²	3,7 · 10 ⁶	1,0 · 10 ⁻⁷	—	—	—	0,37	10	10
Мышьяк-73	1,4 · 10 ⁴	3,8 · 10 ⁻¹⁰	1,3 · 10 ⁻¹¹	4,8 · 10 ²	1,3 · 10 ⁻¹¹	2,4 · 10 ⁷	6,4 · 10 ⁻⁷	—	—	—	0,37	10	10
Мышьяк-74	4,4 · 10 ³	1,2 · 10 ⁻¹⁰	4,2 · 10 ⁻¹²	1,6 · 10 ²	4,2 · 10 ⁻¹²	2,0 · 10 ⁶	5,3 · 10 ⁻⁸	—	—	—	0,37	10	10

Радионуклид	ДК радионуклида										МЗА	
	в воздухе рабочей зоны ДКА		для категории Б ДК _Б						МБк	мкКи		
	в атмосферном воздухе		в воде									
	Бк/м ³	Ки/л ¹	Бк/м ³	Ки/л	Бк/м ³	Ки/л	МБк	мкКи				
Мышьяк-76	3,7·10 ³	1,0·10 ⁻¹⁰	1,2·10 ²	3,4·10 ⁻¹²	7,0·10 ⁵	1,9·10 ⁻⁸	0,37	10				
Селен-75	4,4·10 ³	1,2·10 ⁻¹⁰	1,6·10 ²	4,2·10 ⁻¹²	1,0·10 ⁶	2,8·10 ⁻⁷	0,37	10				
Бром-82	7,0·10 ³	1,9·10 ⁻¹⁰	2,4·10 ²	6,4·10 ⁻¹²	1,4·10 ⁶	3,8·10 ⁻⁸	0,37	10				
Рубидий-86	2,5·10 ³	6,8·10 ⁻¹¹	8,5·10 ¹	2,3·10 ⁻¹²	8,9·10 ⁵	2,4·10 ⁻⁸	0,37	10				
Стронций-89	1,0·10 ³	2,8·10 ⁻¹¹	3,5·10 ¹	9,4·10 ⁻¹³	4,4·10 ⁵	1,2·10 ⁻⁸	0,37	10				
Стронций-90	4,4·10 ¹	1,2·10 ⁻¹²	1,5·10 ⁰	4,0·10 ⁻¹⁴	1,5·10 ⁴	4,0·10 ⁻¹⁰	0,037	1				
Иттрий-90	3,7·10 ³	1,0·10 ⁻¹⁰	1,3·10 ²	3,5·10 ⁻¹²	7,4·10 ⁵	2,0·10 ⁻⁸	0,37	10				
Иттрий-91	6,3·10 ⁵	1,7·10 ⁻⁸	2,2·10 ⁴	5,9·10 ⁻¹⁰	1,2·10 ⁸	3,4·10 ⁻⁶	3,7	100				
Иттрий-91 м	1,2·10 ³	3,2·10 ⁻¹¹	4,1·10 ¹	1,1·10 ⁻¹²	9,6·10 ⁵	2,6·10 ⁻⁸	0,37	10				
Цирконий-95	1,2·10 ³	3,2·10 ⁻¹¹	4,1·10 ¹	1,1·10 ⁻¹²	2,3·10 ⁶	6,2·10 ⁻⁸	0,37	10				
Нисобий-95	3,7·10 ³	1,0·10 ⁻¹⁰	1,2·10 ²	3,4·10 ⁻¹²	3,6·10 ⁶	9,6·10 ⁻⁸	0,37	10				
Молибден-99	7,4·10 ³	2,0·10 ⁻¹⁰	3,3·10 ¹	6,9·10 ⁻¹²	1,4·10 ⁶	3,9·10 ⁻⁸	0,37	10				
Технеций-99 м	5,2·10 ⁵	1,4·10 ⁻⁸	1,8·10 ⁴	4,8·10 ⁻¹⁰	1,0·10 ⁸	2,8·10 ⁻⁶	3,7	100				
Технеций-99	2,2·10 ³	6,0·10 ⁻¹¹	7,8·10 ¹	2,1·10 ⁻¹²	5,9·10 ⁶	1,6·10 ⁻⁷	0,37	10				
Рутений-103	1,9·10 ³	5,2·10 ⁻¹¹	6,7·10 ¹	1,8·10 ⁻¹²	3,0·10 ⁶	8,0·10 ⁻⁸	0,37	10				
Рутений-105	1,9·10 ⁴	5,2·10 ⁻¹⁰	6,7·10 ²	1,8·10 ⁻¹¹	3,7·10 ⁶	1,0·10 ⁻⁷	0,37	10				
Рутений-106	2,1·10 ⁶	6,0·10 ⁻¹²	5,6·10 ⁴	1,9·10 ⁻¹³	4,4·10 ⁸	1,2·10 ⁻⁵	0,037	1				
Родий-103 м	1,9·10 ⁴	5,2·10 ⁻¹⁰	7,4·10 ⁴	2,0·10 ⁻⁹	4,4·10 ⁸	1,2·10 ⁻⁵	3,7	100				
Родий-105	1,9·10 ⁴	5,2·10 ⁻¹⁰	6,7·10 ²	1,8·10 ⁻¹¹	3,7·10 ⁶	1,0·10 ⁻⁷	0,37	10				
Серебро-110 м	3,7·10 ²	1,0·10 ⁻¹¹	1,3·10 ¹	3,6·10 ⁻¹³	1,1·10 ⁶	3,0·10 ⁻⁸	0,37	10				
Серебро-111	8,1·10 ³	2,2·10 ⁻¹⁰	2,8·10 ²	7,5·10 ⁻¹²	1,6·10 ⁶	4,3·10 ⁻⁸	0,37	10				
Кадмий-109	1,9·10 ³	5,2·10 ⁻¹¹	6,7·10 ¹	1,8·10 ⁻¹²	6,7·10 ⁶	1,8·10 ⁻⁷	0,37	10				
Индий-113 м	2,5·10 ⁵	6,8·10 ⁻⁹	8,5·10 ³	2,3·10 ⁻¹⁰	4,4·10 ⁷	1,2·10 ⁻⁶	3,7	100				
Индий-114 м	8,1·10 ²	2,2·10 ⁻¹¹	2,8·10 ¹	7,7·10 ⁻¹³	6,7·10 ⁵	1,8·10 ⁻⁸	0,37	10				
Олово-113	1,9·10 ³	5,2·10 ⁻¹¹	6,7·10 ¹	1,8·10 ⁻¹²	3,0·10 ⁵	8,1·10 ⁻⁸	0,37	10				
Сурьма-124	7,0·10 ²	1,9·10 ⁻¹¹	2,4·10 ¹	6,6·10 ⁻¹³	8,1·10 ⁵	2,2·10 ⁻⁸	0,037	1				
Иод-131	1,6·10 ²	4,2·10 ⁻¹²	5,6·10 ⁰	1,5·10 ⁻¹³	3,2·10 ⁵	1,0·10 ⁻⁹	0,037	1				
Цезий-134	4,8·10 ²	1,3·10 ⁻¹¹	1,6·10 ¹	4,4·10 ⁻¹³	3,2·10 ⁵	8,6·10 ⁻⁹	0,37	10				
Цезий-137	5,2·10 ²	1,4·10 ⁻¹¹	1,8·10 ¹	4,9·10 ⁻¹³	5,6·10 ⁵	1,5·10 ⁻⁸	0,37	10				

Радионуклид	ДК радионуклида										МЗА	
	в воздухе рабочей зоны ДКА		для категории Б ДК _Б						МБк	мкКи		
	в атмосферном воздухе		в воде									
	Бк/м ³	Ки/л ¹	Бк/м ³	Ки/л	Бк/м ³	Ки/л	МБк	мкКи				
Барий-140	1,6·10 ³	4,4·10 ⁻¹¹	5,6·10 ¹	1,5·10 ⁻¹²	9,2·10 ⁵	2,5·10 ⁻⁸	0,37	10				
Лантан-140	4,4·10 ³	1,2·10 ⁻¹⁰	1,6·10 ²	4,2·10 ⁻¹²	8,9·10 ⁵	2,4·10 ⁻⁸	0,37	10				
Церий-141	5,9·10 ³	1,6·10 ⁻¹⁰	2,0·10 ²	5,3·10 ⁻¹²	3,2·10 ⁶	8,8·10 ⁻⁸	0,37	10				
Церий-144	2,4·10 ²	6,4·10 ⁻¹²	8,1·10 ⁰	2,2·10 ⁻¹³	4,4·10 ⁵	1,2·10 ⁻⁸	0,037	1				
Европий-152	4,4·10 ²	1,2·10 ⁻¹¹	1,6·10 ¹	4,2·10 ⁻¹³	2,8·10 ⁶	7,6·10 ⁻⁸	0,037	1				
Европий-154	1,4·10 ²	3,8·10 ⁻¹²	4,8·10 ⁰	1,3·10 ⁻¹³	8,5·10 ⁵	2,3·10 ⁻⁸	0,037	1				
Европий-155	2,7·10 ³	7,2·10 ⁻¹¹	9,2·10 ¹	2,5·10 ⁻¹²	7,4·10 ⁶	2,0·10 ⁻⁷	0,37	10				
Тулий-170	1,3·10 ³	3,5·10 ⁻¹¹	4,4·10 ¹	1,2·10 ⁻¹²	1,7·10 ⁶	4,6·10 ⁻⁸	0,037	1				
Вольфрам-185	4,1·10 ³	1,1·10 ⁻¹⁰	1,4·10 ²	3,8·10 ⁻¹²	4,1·10 ⁶	1,1·10 ⁻⁷	0,37	10				
Иридий-192	9,6·10 ²	2,6·10 ⁻¹¹	3,2·10 ¹	8,7·10 ⁻¹³	1,4·10 ⁶	3,7·10 ⁻⁸	0,37	10				
Ртуть-198	8,9·10 ³	2,4·10 ⁻¹⁰	3,0·10 ²	8,0·10 ⁻¹²	6,7·10 ⁵	4,6·10 ⁻⁸	0,37	10				
Золото-203	2,7·10 ³	7,2·10 ⁻¹¹	9,2·10 ¹	2,5·10 ⁻¹²	2,2·10 ⁶	1,8·10 ⁻⁸	0,37	10				
Таллий-204	1,0·10 ³	2,7·10 ⁻¹¹	3,3·10 ¹	9,0·10 ⁻¹³	2,2·10 ⁶	6,1·10 ⁻⁸	0,37	10				
Полоний-210	3,4·10 ⁶	9,3·10 ⁻¹⁴	1,1·10 ⁻¹	3,1·10 ⁻¹⁵	1,4·10 ⁴	3,9·10 ⁻¹⁰	0,0037	0,1				
Радий-226	9,2·10 ⁻¹	2,5·10 ⁻¹⁴	3,1·10 ⁻²	8,5·10 ⁻¹⁶	2,0·10 ³	5,4·10 ⁻¹¹	0,0037	0,1				
Торий-232	3,7·10 ⁻²	1,0·10 ⁻¹⁵	9,2·10 ⁻⁴	2,5·10 ⁻¹⁷	7,4·10 ²	2,0·10 ⁻¹¹	3,7	100				
Уран-235	2,2·10 ⁰	6,0·10 ⁻¹⁴	7,4·10 ⁻²	2,0·10 ⁻¹⁵	8,5·10 ⁴	2,3·10 ⁻⁹	0,037	1				
Уран-238	2,3·10 ⁰	6,3·10 ⁻¹⁴	8,1·10 ⁻²	2,2·10 ⁻¹⁵	2,2·10 ⁴	5,9·10 ⁻¹⁰	3,7	100				
Уран естественный	2,2·10 ⁰	5,9·10 ⁻¹⁴	7,4·10 ⁻²	2,0·10 ⁻¹⁵	(1,8 мг/л)	1,2·10 ⁻⁹	3,7	(300 г)				
Плутоний-239	3,3·10 ²	9,0·10 ⁻¹⁶	1,1·10 ⁻³	3,0·10 ⁻¹⁷	(1,8 мг/л)	2,2·10 ⁻⁹	0,0037	(150 г) ²				
								0,1				

¹ Здесь и ниже в ряде таблиц приведены данные в Ки/л, так как в этих единицах приведены ДК в НРБ-76/87.

² В отсутствие операций, сопровождающихся пылеобразованием, допускается МЗА, равная 1 кг.

$$\text{распределении дозы по году } ДМД_A = 50 \frac{\text{мЗв}}{\text{год}} = 1 \frac{\text{мЗв}}{\text{неделя}} = 29 \frac{\text{мкЗв}}{\text{ч}} = 8,2 \frac{\text{нЗв}}{\text{с}}$$

Если сравнить основные дозовые пределы с фоновым облучением человека, то нетрудно определить, что для первой группы критических органов, в которую включается тотальное облучение всего организма, ПДД примерно в 14 раз больше, чем среднее фоновое облучение за счет всех источников фона, а ПД совпадает с полной дозой фонового облучения в пределах ее флуктуации.

Проектирование защиты от внешнего ионизирующего излучения (включая защиту боксов, каньонов и других необслуживаемых помещений, посещаемых персоналом периодически или при проведении ремонтных работ) в связи с возможными неточностями в исходных данных необходимо проводить с коэффициентом запаса по мощности эквивалентной дозы, равным 2. Должны учитываться дополнительно такие факторы, как наличие других источников ионизирующих излучений, воздействующих на облучаемых лиц, перспективное увеличение мощности источников излучения, радиационная стойкость материалов и аппаратуры, а также сорбция радиоактивных веществ конструктивными материалами. Проектирование защиты от внешнего ионизирующего излучения должно выполняться с учетом назначения помещений и территорий и в зависимости от категории облучаемых лиц и длительности облучения. Для стандартной продолжительности пребывания в помещениях (на территории) значения проектной мощности эквивалентной дозы приведены в табл. 3.3.

Допустимые концентрации ДК радионуклидов инертных газов, содержащихся

Радионуклид	Объем помещения, м ³					
	7		50		250	
	Бк/м ³	Ки/л	Бк/м ³	Ки/л	Бк/м ³	Ки/л
Аргон-41	1,9·10 ⁶	5,2·10 ⁻⁸	1,8·10 ⁶	5,0·10 ⁻⁸	1,8·10 ⁶	4,9·10 ⁻⁸
Криптон-85	4,4·10 ⁶	1,2·10 ⁻⁷	4,4·10 ⁶	1,2·10 ⁻⁷	4,1·10 ⁶	1,1·10 ⁻⁷
Криптон-85m	3,6·10 ⁶	9,6·10 ⁻⁸	3,4·10 ⁶	9,3·10 ⁻⁸	3,3·10 ⁶	9,0·10 ⁻⁸
Криптон-87	1,5·10 ⁶	4,0·10 ⁻⁸	1,1·10 ⁶	2,9·10 ⁻⁸	6,7·10 ⁵	1,8·10 ⁻⁸
Криптон-88	3,1·10 ⁶	8,4·10 ⁻⁸	2,2·10 ⁶	6,1·10 ⁻⁸	1,8·10 ⁶	4,9·10 ⁻⁸
Криптон-89	1,8·10 ⁶	4,9·10 ⁻⁸	9,6·10 ⁵	2,6·10 ⁻⁸	6,3·10 ⁵	1,7·10 ⁻⁸
Ксенон-133	1,4·10 ⁷	3,9·10 ⁻⁷	1,4·10 ⁷	3,8·10 ⁻⁷	1,4·10 ⁷	3,7·10 ⁻⁷
Ксенон-133m	4,8·10 ⁶	1,3·10 ⁻⁷	4,1·10 ⁶	1,1·10 ⁻⁷	3,7·10 ⁶	1,0·10 ⁻⁷
Ксенон-135	3,0·10 ⁶	8,2·10 ⁻⁸	2,8·10 ⁶	7,7·10 ⁻⁸	2,8·10 ⁶	7,6·10 ⁻⁸
Ксенон-135m	5,9·10 ⁶	1,6·10 ⁻⁷	5,2·10 ⁶	1,4·10 ⁻⁷	5,2·10 ⁶	1,4·10 ⁻⁷
Ксенон-137	1,8·10 ⁶	5,0·10 ⁻⁸	8,9·10 ⁵	2,4·10 ⁻⁸	5,6·10 ⁵	1,5·10 ⁻⁸
Ксенон-138	1,4·10 ⁶	3,7·10 ⁻⁸	1,0·10 ⁶	2,8·10 ⁻⁸	8,1·10 ⁵	2,2·10 ⁻⁸

* Величина ДК зависит от критического органа (кожа, подкожные ткани, гонады) критических органов.

При проектировании учреждений, предназначенных для работы с открытыми источниками, дополнительно к мероприятиям по защите от внешнего излучения необходимо предусматривать меры по защите от внутреннего облучения и охране окружающей среды от радиоактивных загрязнений, при этом суммарная доза от внешних и внутренних источников излучения не должна превышать допустимого уровня, установленного НРБ-76/87.

Регламентация и контроль за облучением категории В относятся к компетенции Министерства здравоохранения.

Допустимые уровни — производные нормативы для поступления радионуклидов в организм человека за календарный год ПДП, усредненных за год мощности эквивалентной дозы ДМД, содержания радионуклидов в организме ДС, их концентрации (объемной активности) ДК в воздухе, питьевой воде и рационе, плотности потока ДПП частиц (фотонов) и т. д., рассчитанные из значений основных дозовых пределов ПДД или ПД.

Численные значения допустимых концентраций отдельных радионуклидов в воздухе рабочих помещений ДК_А для категории А и в атмосферном воздухе и воде ДК_Б для категории Б приведены в табл. 3.4. При расчетах принимался объем поступающего воздуха в организм человека для категории А 2,5·10⁶ л/год, для категории Б — 7,3·10⁶ л/год, объем воды для категории Б 800 л/год.

Приведенные в таблицах ДК рассчитаны по наиболее жестким значениям предельно допустимого годового поступления (ПДП) для категории А или предела годового поступления (ПГП) для категории Б.

Таблица 3.5

в воздухе рабочих помещений и на открытых местностях* [10]

				Открытая местность			
2000		17000		Категория А		Категория Б	
Бк/м ³	Ки/л	Бк/м ³	Ки/л	Бк/м ³	Ки/л	Бк/м ³	Ки/л
1,7·10 ⁶	4,6·10 ⁻⁸	1,2·10 ⁶	3,4·10 ⁻⁸	7,8·10 ⁴	2,1·10 ⁻⁹	1,8·10 ³	4,9·10 ⁻¹¹
4,1·10 ⁶	1,1·10 ⁻⁷	4,1·10 ⁶	1,1·10 ⁻⁷	4,1·10 ⁶	1,1·10 ⁻⁷	9,6·10 ⁴	2,6·10 ⁻⁹
3,3·10 ⁶	8,9·10 ⁻⁸	3,1·10 ⁶	8,5·10 ⁻⁸	6,3·10 ⁵	1,7·10 ⁻⁸	1,5·10 ⁴	4,0·10 ⁻¹⁰
4,8·10 ⁵	1,3·10 ⁻⁸	4,4·10 ⁵	1,2·10 ⁻⁸	1,3·10 ⁵	3,5·10 ⁻⁹	3,0·10 ³	8,1·10 ⁻¹¹
1,4·10 ⁶	3,9·10 ⁻⁸	8,1·10 ⁵	2,2·10 ⁻⁸	4,8·10 ⁴	1,3·10 ⁻⁹	1,1·10 ³	3,1·10 ⁻¹¹
4,4·10 ⁵	1,2·10 ⁻⁸	4,1·10 ⁵	1,1·10 ⁻⁸	4,8·10 ⁴	1,3·10 ⁻⁹	1,1·10 ³	3,0·10 ⁻¹¹
1,3·10 ⁷	3,6·10 ⁻⁷	1,2·10 ⁷	3,4·10 ⁻⁷	2,2·10 ⁶	6,1·10 ⁻⁸	5,2·10 ⁴	1,4·10 ⁻⁹
3,6·10 ⁶	9,8·10 ⁻⁸	3,6·10 ⁶	9,6·10 ⁻⁸	2,9·10 ⁶	7,8·10 ⁻⁸	6,3·10 ⁴	1,7·10 ⁻⁹
2,8·10 ⁶	7,5·10 ⁻⁸	2,6·10 ⁶	7,1·10 ⁻⁸	4,1·10 ⁵	1,1·10 ⁻⁸	9,2·10 ³	2,5·10 ⁻¹⁰
4,8·10 ⁶	1,3·10 ⁻⁷	3,2·10 ⁶	8,8·10 ⁻⁸	2,4·10 ⁵	6,5·10 ⁻⁹	5,2·10 ³	1,4·10 ⁻¹⁰
4,4·10 ⁵	1,2·10 ⁻⁸	4,1·10 ⁵	1,1·10 ⁻⁸	3,4·10 ⁵	9,3·10 ⁻⁹	7,8·10 ³	2,1·10 ⁻¹⁰
7,0·10 ⁵	1,9·10 ⁻⁸	6,7·10 ⁵	1,8·10 ⁻⁸	9,2·10 ⁵	2,5·10 ⁻⁹	2,1·10 ³	5,8·10 ⁻¹¹

В таблице приведены наименьшие значения из рассчитанных для указанных

Таблица 3.6

Допустимая плотность потока ДПП_А (см⁻²·с⁻¹) для персонала и коэффициент изотропности ν для излучений различных видов с энергией E_0 (для β -излучения E_0 соответствует граничной энергии спектра). Расчеты ДПП_А выполнены для времени облучения 1700 ч в год (для большей части персонала установлены 36-часовая рабочая неделя и 4—6-недельный отпуск) [10]

E_0 , МэВ	Вид излучения									
	Фотонное излучение		Нейтроны		Моноэнергетические электроны (при облучении кожи)		β -излучение (при облучении кожи)		Протоны	
	ДПП _А	ν	ДПП _А	ν	ДПП _А	ν	ДПП _А	ν	ДПП _А	ν
Тепловые нейтроны			910	6						
$1 \cdot 10^{-7}$			920	6						
$1 \cdot 10^{-6}$			960	5						
$1 \cdot 10^{-5}$			960	5						
$1 \cdot 10^{-4}$			960	5						
$5 \cdot 10^{-4}$	130	2	680	6						
$2 \cdot 10^{-3}$	3100	2	330	5						
$3 \cdot 10^{-2}$	7600	2								
$5 \cdot 10^{-2}$	16 000	2								
$1 \cdot 10^{-1}$	11 000	1,8	98	3	29	5				
$2 \cdot 10^{-1}$	7000	1,7			56	2	16	63		
$3 \cdot 10^{-1}$					78	1,5	23	8,9		
$4 \cdot 10^{-1}$							33	5,3		
$5 \cdot 10^{-1}$	3100	1,6	31	2,2	110	1,2	38	3,8		
$7 \cdot 10^{-1}$							57	2,5		
1,0	1700	1,4	22	2,2	130	1,0	78	1,7		
1,5							100	1,2		
2,0	980	1,3			150	0,9	120	1,1	0,0048	
2,5			19	1,5			120	1,0		
3,0					150	0,8	130	1,0		
3,5							130	1,0		
5	510	1,2	18	1,6					0,0082	
10	280	1,2	16	1,7					0,014	
20	190	1,2	19	2,5	140				0,018	
50	82	1,0			130				0,092	
$1 \cdot 10^2$	41	1,4	22	1,9	120				0,34	1,8
$2 \cdot 10^2$	27	1,4			100				2,7	1,8
$5 \cdot 10^2$	17	1,7	19	1,9	65				6,8	1,2
$1 \cdot 10^3$	14	1,7	12	1,9	53				5,4	1,2
$2 \cdot 10^3$	13	1,7			45					
$3 \cdot 10^3$			8,8	1,9					3,3	1,3

Продолжение табл. 3.6

E_0 , МэВ	Вид излучения									
	Фотонное излучение		Нейтроны		Моноэнергетические электроны (при облучении кожи)		β -излучение (при облучении кожи)		Протоны	
	ДПП _А	ν	ДПП _А	ν	ДПП _А	ν	ДПП _А	ν	ДПП _А	ν
$5 \cdot 10^3$	11	1,7			38					
$1 \cdot 10^4$	10	1,7	6,8	1,9	33				2,3	1,6
$2 \cdot 10^4$	9,1	1,7			27					
$3 \cdot 10^4$			6,3	1,6					1,7	1,6
$1 \cdot 10^5$			5,4	1,7					1,3	1,8
$3 \cdot 10^5$			5,1	1,8					1,1	1,9
$1 \cdot 10^6$			4,8	1,9					0,93	1,9

Таблица 3.7

Допустимые уровни загрязнения поверхностей ДЗ_А, част./(см²·мин) [10]

Объект загрязнения	α -Активные нуклиды* ¹		β -Активные нуклиды
	отдельные* ²	прочие	
Кожные покровы, полотенца, спецбелье, внутренняя поверхность лицевых частей средств индивидуальной защиты	1	1	100* ³
Основная спецодежда, внутренняя поверхность дополнительных средств индивидуальной защиты	5	20	800* ³
Наружные поверхности спецобуви и дополнительных средств индивидуальной защиты, используемых в помещениях:			
постоянного пребывания персонала	5	20	2000
периодического пребывания персонала	50	200	8000
Другие средства индивидуальной защиты:			
внутренняя поверхность	5	20	800
наружная поверхность	50	200	8000
Поверхности помещений постоянного пребывания персонала и находящегося в них оборудования	5	20	2000
Поверхности помещений периодического пребывания персонала и находящегося в них оборудования	50	200	8000

*¹ Для поверхности рабочих помещений и оборудования, загрязненных α -активными радионуклидами, нормируется снимаемое (нефиксированное) загрязнение; для остальных поверхностей — суммарное (снимаемое и неснимаемое) загрязнение.

*² К отдельным радионуклидам относятся α -активные нуклиды, допустимая концентрация которых в воздухе рабочих помещений $ДК_A \leq 0,37$ Бк/м³ ($ДК_A \leq 1 \cdot 10^{-14}$ Ки/л).

*³ Для $^{90}\text{Sr} + ^{90}\text{Y}$ допустимое загрязнение устанавливается в 5 раз меньшим.

В табл. 3.4 приведена для каждого нуклида также *минимально значимая активность* МЗА — наименьшая активность открытого источника на рабочем месте, при которой еще требуется разрешение органов Госсаннадзора на использование этого источника.

Радиационное воздействие от присутствия в воздухе радионуклидов инертных газов (Аг, Кг, Хе) определяется не внутренним облучением, а внешним β - и γ -излучением из объема воздуха помещения. Численные значения ДК для этих газов в зависимости от объема помещения, где проводятся работы, приведены в табл. 3.5.

Допустимая плотность потоков ДПП_А различных видов излучений приведена в табл. 3.6. При расчетах принята годовая продолжительность времени облучения лиц категории А $T=1700$ ч $=1,02 \cdot 10^5$ мин $=6,12 \cdot 10^6$ с. Для категорий Б и В время облучения $T=8800$ ч $=5,28 \cdot 10^5$ мин $=3,17 \cdot 10^7$ с.

При установлении контрольных уровней можно использовать и другие расчетные значения T в зависимости от условий облучения и фактической продолжительности облучения. В этом случае приведенные в табл. 3.6 значения ДПП_А изменяются обратно пропорционально T и плотность потока для времени облучения T ч в год ДПП_А(T) определяют по формуле

$$\text{ДПП}_A(T) = \text{ДПП}_A(1700) \cdot 1700/T, \quad (3.2)$$

где ДПП_А(1700) — приведенные в табл. 3.6 значения ДПП_А для $T=1700$ ч.

В табл. 3.6 приведены также коэффициенты изотропности ν . *Коэффициент изотропности* — отношение значения максимальной эквивалентной дозы в критическом органе (теле) человека при нормальном падении внешнего излучения со стороны груди к максимальной эквивалентной дозе в том же органе (теле) при угловом распределении этого излучения в реальных условиях. В табл. 3.6 значения ν приведены для излучений, изотропных в телесном угле 4π ср (для электронов и β -излучения — в угле 2π ср).

Для излучения, падающего нормально на грудь человека, ν принимается равным 1. То же значение следует использовать при неизвестном угловом распределении излучения. Значения допустимых плотностей потоков ДПП_А при равномерном облучении человека со всех сторон следует увеличивать в ν раз по сравнению с приведенными в табл. 3.6 значениями для излучения, падающего нормально на грудь.

Значения допустимого общего загрязнения поверхности ДЗ_А приведены в табл. 3.7.

§ 3.5. НОРМИРОВАНИЕ ПРИ КОМБИНИРОВАННОМ ВОЗДЕЙСТВИИ СМЕШАННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Приведенные в § 3.4 допустимые плотности потоков и допустимые концентрации радионуклидов рассчитаны в предположении отсутствия облучения частицами другого вида излучения или других радионуклидов. В реальных условиях работы на ядерно-технических установках таких идеализированных условий обычно не бывает.

Для смеси радионуклидов с известным процентным составом допустимую концентрацию смеси радионуклидов ДК_Σ в воздухе или воде

рассчитывают по формуле

$$\text{ДК}_\Sigma = \sum_j p_j / \sum_j \frac{p_j}{\text{ДК}_j}, \quad (3.3)$$

где ДК_ж — допустимая концентрация j -го радионуклида; p_j — доля активности смеси, приходящейся на j -й нуклид; заметим, что не обязательно $\sum p_j = 1$.

Аналогично рассчитывают числовые значения предельно допустимого годового поступления, пределов годового поступления, допустимого содержания смеси радионуклидов известного состава, минимально значимой активности нескольких радионуклидов.

Для радионуклидов неизвестного или частично известного состава допустимые концентрации приведены в табл. 3.8 при поступлении радионуклидов через органы дыхания и в табл. 3.9 — при их поступлении через органы пищеварения.

Для немонотонных источников при внешнем облучении допустимую плотность потока ДПП можно рассчитать по формуле

$$\text{ДПП} = \sum_j p_j / \sum_j \frac{p_j}{\text{ДПП}_j}, \quad (3.4)$$

где ДПП_ж — допустимая плотность потока для частиц j -й энергии; p_j — доля испускаемых частиц j -й энергии в общей плотности потока; заметим, что не обязательно $\sum p_j = 1$.

Таблица 3.8

Допустимая концентрация ДК смеси радионуклидов неизвестного или частично известного состава при поступлении через органы дыхания [10]

Сведения о составе смеси радионуклидов, поступающей через органы дыхания	ДК _А		ДК _Б	
	Бк/м ³	Ки/л	Бк/м ³	Ки/л
Сведения отсутствуют	$1,5 \cdot 10^{-1}$	$4 \cdot 10^{-16}$	$3,7 \cdot 10^{-1}$	$1 \cdot 10^{-17}$
Отсутствует ²⁴⁸ Cm	$3,0 \cdot 10^{-1}$	$8 \cdot 10^{-16}$	$1,1 \cdot 10^{-3}$	$3 \cdot 10^{-17}$
Отсутствуют ²³¹ Pa, ²³⁹ , ²⁴⁰ , ²⁴² , ²⁴⁴ Pu, ²⁴⁸ Cm, ²⁴⁹ , ²⁵¹ Cf	$7,4 \cdot 10^{-1}$	$2 \cdot 10^{-15}$	$1,8 \cdot 10^{-3}$	$5 \cdot 10^{-17}$
Отсутствуют ²²⁷ Ac, ²³⁰ Th, ²³¹ Pa, ²³⁸ , ²³⁹ , ²⁴⁰ , ²⁴² , ²⁴⁴ Pu, ²⁴⁸ Cm, ²⁴⁹ , ²⁵¹ Cf	$1,5 \cdot 10^{-1}$	$4 \cdot 10^{-15}$	$3,7 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-16}$
Отсутствуют любые α -активные нуклиды и ²²⁷ Ac	$7,4 \cdot 10^{-1}$	$2 \cdot 10^{-11}$	$3,0 \cdot 10^{-2}$	$8 \cdot 10^{-16}$
Отсутствуют любые α -активные нуклиды и ²¹⁰ Pb, ²²⁷ Ac, ²²⁸ Ra, ²⁴¹ Pu	$7,4 \cdot 10^0$	$2 \cdot 10^{-11}$	$3,0 \cdot 10^{-1}$	$8 \cdot 10^{-15}$
Отсутствуют любые α -активные нуклиды и ⁹⁰ Sr, ¹²⁹ I, ²¹⁰ Pb, ²²⁷ Ac, ²²⁸ Ra, ²³⁰ Pa, ²⁴¹ Pu, ²⁴⁹ Bk	$1,1 \cdot 10^1$	$3 \cdot 10^{-12}$	$3,7 \cdot 10^0$	$1 \cdot 10^{-13}$

Таблица 3.9

Допустимая концентрация ДК_Б в воде для категории Б смеси радионуклидов неизвестного или частично известного состава [10]

Сведения о составе смеси радионуклидов, поступающей через органы пищеварения	ДК _Б	
	Бк/м ³	Ки/л
Сведения отсутствуют	1,1 · 10 ³	3 · 10 ⁻¹¹
Отсутствуют ¹²⁹ I, ²¹⁰ Pb, ²²⁶ Ra, ²²⁸ Ra, ²⁵⁴ Cf	1,1 · 10 ⁴	3 · 10 ⁻¹⁰
Отсутствуют ⁹⁰ Sr, ¹²⁹ I, ²¹⁰ Pb, ²¹⁰ Po, ²²³ Ra, ²²⁶ Ra, ²²⁸ Ra, ^{ест} Th, ²³¹ Pa, ²³² U, ²³⁵ U, ²³⁸ U, ²⁴⁸ Cm, ²⁵⁴ Cf, ²⁵⁶ Fm	7,4 · 10 ⁴	2 · 10 ⁻⁹

При одновременном воздействии нескольких радиационных факторов — нескольких видов внешнего излучения, нескольких радионуклидов, поступления радионуклидов в организм как с вдыхаемым воздухом, так и с рационом, при сочетанном воздействии внешнего и внутреннего облучения и т. п. — должно выполняться условие, чтобы отношение максимальной эквивалентной дозы в критическом органе $H_{\text{макс}, \Sigma}$ смешанного внешнего излучения к ПДД для этого органа и отношение поступлений P_i радионуклидов к их ПДП_{*i*} в сумме не превышали единицу:

$$\frac{H_{\text{макс}, \Sigma}}{\text{ПДД}} + \sum_i \frac{P_i}{\text{ПДП}_i} \leq 1. \quad (3.5)$$

Здесь $H_{\text{макс}, \Sigma} \leq \sum_i H_{\text{макс}, i}$, где $H_{\text{макс}, i}$ — максимальная эквивалентная доза *i*-го вида внешнего излучения в критическом органе.

Если известны значения ПДП_{*i*} для нескольких органов, то во всех членах суммы следует использовать значения для одного и того же органа и в качестве критического выбрать тот, для которого сумма окажется наибольшей.

Аналогичные соотношения должны выполняться для среднегодовой мощности $\dot{H}_{\text{макс}, \Sigma}$ максимальной эквивалентной дозы и среднегодовых концентраций K_j радионуклидов в воздухе рабочей зоны или среднегодового содержания C_j радионуклидов в организме:

$$\frac{\dot{H}_{\text{макс}, \Sigma}}{\text{ДМД}_A} + \sum_i \frac{K_j}{\text{ДК}_{A_j}} \leq 1; \quad (3.6)$$

$$\frac{\dot{H}_{\text{макс}, \Sigma}}{\text{ДМД}_A} + \sum_i \frac{C_j}{\text{ДС}_{A_j}} \leq 1. \quad (3.7)$$

Для категории Б должны выполняться аналогичные соотношения.

ПОЛЯ ИЗЛУЧЕНИЙ ТОЧЕЧНЫХ И ПРОТЯЖЕННЫХ ИСТОЧНИКОВ ЗА ЗАЩИТОЙ И БЕЗ ЗАЩИТЫ

§ 4.1. ЗАКОНЫ ОСЛАБЛЕНИЯ ИЗЛУЧЕНИЙ В ВЕЩЕСТВЕ

Взаимодействие излучений с веществом количественно характеризуется сечениями или коэффициентами взаимодействия ионизирующих частиц с веществом [5].

Сечение взаимодействия ионизирующих частиц σ_i — отношение числа n_i определенного *i*-го типа взаимодействий ионизирующих частиц и частиц-мишеней в элементарном объеме, при флюенсе Φ ионизирующих частиц, к числу N частиц-мишеней в этом объеме и к этому флюенсу: $\sigma_i = n_i / (\Phi N)$. Это сечение взаимодействия часто называют парциальным, характеризующим для данного вида, энергии излучения и материала среды вероятность протекания одного из возможных процессов взаимодействия.

Полное сечение взаимодействия ионизирующих частиц σ — сумма всех парциальных сечений взаимодействия σ_i ионизирующих частиц данного вида, соответствующих различным реакциям или процессам: $\sigma = \sum_i \sigma_i$. Полным сечением взаимодействия также называют сечение,

равное сумме разных комбинаций парциальных сечений или их частей.

Указанные выше сечения взаимодействия, отнесенные к одному атому (ядру или электрону), называют *микроскопическими*. Единица микроскопических сечений взаимодействия в СИ — квадратный метр (м²). Внесистемной единицей микроскопического сечения является барн (б); $1\text{б} = 10^{-28} \text{ м}^2 = 10^{-24} \text{ см}^2$.

Единица «барн», равная 100 фм², получила широкое распространение в отечественной и зарубежной практике. Вопрос о сроках изъятия единицы «барн» для сечения взаимодействия требует специального согласованного решения [5].

Макроскопическое сечение взаимодействия ионизирующих частиц Σ_i — произведение сечения взаимодействия σ_i на концентрацию C частиц-мишеней в веществе: $\Sigma_i = \sigma_i C$.

Полное макроскопическое сечение взаимодействия ионизирующих частиц Σ — сумма всех парциальных макроскопических сечений взаимодействия Σ_i ионизирующих частиц данного вида, соответствующих различным реакциям и процессам: $\Sigma = \sum_i \Sigma_i$.

Микроскопические сечения взаимодействия для одного электрона σ , см², или для одного атома σ_1 , см², связаны с макроскопическими сечениями взаимодействия Σ , см⁻¹, соотношениями:

$$\Sigma = \sigma n_e = \sigma \rho (N_A/A) Z; \quad (4.1)$$

$$\Sigma = \sigma n_a = \sigma \rho N_A/A, \quad (4.2)$$

где n_a , n_e — число атомов и электронов в 1 см³ вещества соответственно; $n_a = \rho N_A/A$; $n_e = n_a Z = \rho (N_A/A) Z$; N_A — число Авогадро; ρ , Z , A — плотность, атомный номер и атомная масса вещества соответственно.

Макроскопические сечения взаимодействия для фотонов принято называть *коэффициентами взаимодействия* и обозначать μ . Полное макроскопическое сечение взаимодействия для фотонов называют *коэффициентом ослабления*. Различают *линейный* μ и *массовый* μ_m коэффициенты ослабления, связанные между собой соотношением

$$\mu_m = \mu/\rho, \quad (4.3)$$

где ρ — плотность вещества.

Различают геометрию *узкого* («хорошая» геометрия) и *широкого* («плохая» геометрия) пучков. Геометрия узкого пучка характеризуется тем, что детектор регистрирует только первичное нерассеянное излучение источника, каждая провзаимодействовавшая со средой частица и вторичное излучение детектором не регистрируются.

В реальных задачах наряду с нерассеянным излучением источника регистрируется также рассеянное в среде и вторичное излучение.

Под рассеянным излучением обычно понимают частицы, претерпевшие однократное или многократное (двукратное и более) рассеяния.

Геометрия, при которой детектор регистрирует нерассеянное и рассеянное первичное и вторичное излучения, называют геометрией широкого пучка.

Закон ослабления излучения пластиной толщиной d в геометрии узкого пучка для плоского мононаправленного источника можно записать в виде

$$\begin{aligned} G(d) &= G_0 \exp(-\mu d) = G_0 \exp(-\Sigma d) = \\ &= G_0 \exp(-0,693d/\Delta_{1/2}) = G_0 \exp(-2,3d/\Delta_{1/10}) = \\ &= G_0 \exp(-d/L), \end{aligned} \quad (4.4)$$

где $G(d)$ и G_0 — характеристики поля излучения (плотность потока энергии, мощность дозы и т. д.) после защиты толщиной d и без нее соответственно; $\Delta_{1/2}$, $\Delta_{1/10}$, L — *слой половинного ослабления*, *слой десятичного ослабления* и *длина релаксации* соответственно, характеризующие толщину защиты, ослабляющую излучение в 2, 10 и e раз соответственно, при этом

$$\mu = \Sigma = 0,693/\Delta_{1/2} = 2,3/\Delta_{1/10} = 1/L. \quad (4.5)$$

Рассеянное в среде излучение и вторичное излучение для фотонов обычно учитывают, вводя в закон (4.4) множителем фактор накопления фотонного излучения B (см. § 5.3, 5.4), для нейтронов часто используют длину релаксации L в геометрии широкого пучка (см. § 6.4).

Величину, показывающую, во сколько раз требуется уменьшить поле излучения (плотность потока энергии, мощность дозы и т. д.) защитой, называют *кратностью ослабления* и обозначают k .

§ 4.2. ПОЛЯ ИЗЛУЧЕНИЙ ТОЧЕЧНЫХ И ПРОТЯЖЕННЫХ ИСТОЧНИКОВ БЕЗ УЧЕТА РАССЕЯННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Ниже приведены формулы для расчетов полей излучений точечных и широко используемых протяженных источников без учета рассеянного в источнике излучения без защиты и за защитой без учета рассеян-

ного в ней излучения*. Ослаблением излучения в стенках объемных источников пренебрегается.

Приведенные ниже более 100 формул для протяженных источников [7, 9, 62—69] получены интегрированием функций ослабления нерассеянного излучения точечных источников по всему пространству, занимаемому протяженным источником. Методы учета рассеянного излучения рассмотрены в § 4.4.

Дадим некоторые пояснения к формулам (4.6) — (4.122):

1. Формулы приводятся для расчетов плотности потока частиц φ_i (для точечных источников приведены также формулы для расчета плотности потока энергии I , мощности воздушной кермы \dot{K} , мощности поглощенной дозы в воздухе \dot{D} , мощности эквивалентной дозы \dot{H} , мощности максимальной эквивалентной дозы $\dot{H}_{\text{макс}}$) для точки детектирования A_i . Нижний индекс i при φ_i относит эту величину к точке детектирования A_i , обозначенной на соответствующем рисунке.

2. За исключением особо оговоренных случаев, источники излучения изотропные с равномерным распределением мощности излучателя для протяженных источников.

3. Для расчетов поля излучения за защитой формулы записаны для моноэнергетических источников. Для немонаэнергетических источников расчеты следует проводить с использованием принципа аддитивности.

4. Защита во всех случаях принята в виде пластины постоянной толщины.

5. В формулах приняты следующие обозначения: S , S_L , S_A , S_V — полный, линейный, поверхностный и объемный выход частиц источника в телесный угол 4π ср соответственно. Можно также рассматривать число частиц, испущенных источником в полупространство в телесный угол 2π ср в направлении защиты или точки детектирования. В этих случаях полный, линейный, поверхностный, объемный выход частиц источника обозначается S^+ , S_L^+ , S_A^+ , S_V^+ соответственно. Наиболее часто такое задание используется для поверхностных источников. В формулах также обозначено: b — толщина защиты, выражается в числе длин свободного пробега, для гомогенной защиты $b = \mu d$, для гете-

рогенной m -слойной защиты $b = \sum_{i=1}^m \mu_i d_i$, где d_i — толщина i -го слоя; μ_S ,

μ — коэффициенты ослабления излучения в материале источника и защиты соответственно (для нейтронов вместо коэффициентов μ_S и μ следует использовать макроскопические сечения взаимодействия Σ_S и Σ); $E_n(x)$ — интегральная показательная функция n -го рода, значения $E_n(x)$ при $n=1, 2, 3$ приведены в приложении.

6. Для моноэнергетических источников переход от плотности потока частиц к интенсивности излучения осуществляется путем умножения правой части формул на энергию частиц E_0 , переход к мощности дозиметрической величины \dot{G} (например, к мощности воздушной кермы, мощности эквивалентной дозы, мощности максимальной эквивалентной дозы и т. д.) осуществляется путем замены в правой части формул сомножителей $S/(4\pi)$, $S_L/(4\pi)$, $S_A/(4\pi)$, $S_V/(4\pi)$ или $S^+/(2\pi)$, $S_L^+/(2\pi)$, $S_A^+/(2\pi)$, $S_V^+/(2\pi)$ на сомножители $A\Gamma_G$, $A_L\Gamma_G$, $A_A\Gamma_G$, $A_V\Gamma_G$, где A , A_L , A_A , A_V

* При расчете поля без учета рассеянного излучения не учитывается, конечно, вторичное излучение.

полная, линейная, поверхностная или объемная активность источника соответственно; Γ_G — гамма-постоянная радионуклида по мощности дозиметрической величины \dot{G} . Если в A, A_L, A_A, A_V активность выражена в Бк, расстояния — в м, гамма-постоянная в аГр·м²/(с·Бк) или аЗв·м²/(с·Бк), то мощность дозиметрической величины будет выражена в аГр/с или в аЗв/с соответственно.

ФОРМУЛЫ ДЛЯ РАСЧЕТОВ ПОЛЕЙ ИЗЛУЧЕНИЯ ИСТОЧНИКОВ РАЗЛИЧНЫХ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ФОРМ БЕЗ ЗАЩИТЫ

Точечный изотропный источник (рис. 4.1)

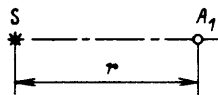


Рис. 4.1

$$\varphi_1 = \frac{S}{4\pi r^2} \quad (4.6)$$

Для радиоактивного нуклида активностью A , Бк, испускающего m групп фотонов разных энергий ($i=1, 2, \dots, m$) с энергией i -й группы E_{oi} , МэВ, и квантовым выходом n_i , фотон/распад, на расстоянии r , м, от точечного изотропного источника в точке A_1 :
плотность потока энергии I , МэВ/(см²·с):

$$I = \frac{A \sum_{i=1}^m E_{oi} n_i}{4\pi r^2 \cdot 10^4}; \quad (4.7)$$

мощность воздушной кермы \dot{K} , аГр/с:

$$\dot{K} = A\Gamma_K/r^2, \quad (4.8)$$

если Γ_K — керма-постоянная, аГр·м²/(с·Бк);
мощность поглощенной дозы в воздухе \dot{D} , аГр/с, при наличии электронного равновесия:

$$\dot{D} \simeq \dot{K} = A\Gamma_K/r^2; \quad (4.9)$$

мощность эквивалентной дозы \dot{H} , аЗв/с:

$$\dot{H} = A\Gamma_H/r^2 \simeq 1,09A\Gamma_K/r^2, \quad (4.10)$$

если Γ_H — гамма-постоянная по мощности эквивалентной дозы, аЗв·м²/(с·Бк);

мощность максимальной эквивалентной дозы $\dot{H}_{\text{макс}}$, аЗв/с;

$$\dot{H}_{\text{макс}} = A\Gamma_{H,\text{макс}}/r^2, \quad (4.11)$$

если $\Gamma_{H,\text{макс}}$ — гамма-постоянная по мощности максимальной эквивалентной дозы, аЗв·м²/(с·Бк).

Дозиметрическая величина G за время облучения t :

$$G = \frac{\dot{G}_0}{\lambda} (1 - e^{-\lambda t}), \quad (4.12)$$

если \dot{G}_0 — мощность данной дозиметрической величины в начальный момент времени; λ — постоянная распада.

При $T_{1/2} \gg t$

$$G = \dot{G}_0 t. \quad (4.13)$$

Линейный непоглощающий источник (рис. 4.2)

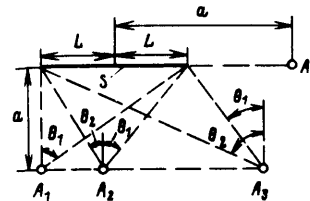


Рис. 4.2

$$\varphi_1 = \frac{S_L}{4\pi a} \theta_1. \quad (4.14)$$

Частный случай к формуле (4.14): полубесконечный линейный источник ($\theta_1 = \frac{\pi}{2}$):

$$\varphi_1 = \frac{S_L}{8a}, \quad (4.15)$$

$$\varphi_2 = \frac{S_L}{4\pi a} (\theta_1 + \theta_2). \quad (4.16)$$

Частные случаи к формуле (4.16):

$$a) \theta_1 = \theta_2; \varphi_2 = \frac{S_L}{2\pi a} \theta_1; \quad (4.17)$$

б) бесконечный линейный источник ($\theta_1 = \theta_2 = \frac{\pi}{2}$):

$$\varphi_2 = \frac{S_L}{4a}, \quad (4.18)$$

$$\varphi_3 = \frac{S_L}{4\pi a} (\theta_2 - \theta_1). \quad (4.19)$$

Значения углов θ_1 и θ_2 в формулах (4.14)–(4.19) вычисляются в радианах.

$$\varphi_4 = \frac{S_L L}{2\pi (a^2 - L^2)}. \quad (4.20)$$

Линейный поглощающий источник (рис. 4.2)

$$\varphi_4 = \frac{S_L}{4\pi} e^{\mu_S(a-L)} \left\{ \frac{1}{a-L} E_2[\mu_S(a-L)] - \frac{1}{a+L} E_2[\mu_S(a+L)] \right\}. \quad (4.21)$$

При $a \gg 2L$

$$\varphi_4 = \frac{S_L L}{2\pi a^2} \frac{1}{2\mu_S L} (1 - e^{-2\mu_S L}). \quad (4.22)$$

Круговой линейный непоглощающий источник (рис. 4.3)

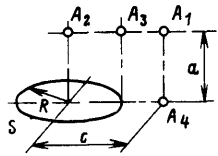


Рис. 4.3

$$\varphi_1 = \frac{S_L R}{2\sqrt{(c^2 - R^2)^2 + 2a^2(c^2 + R^2) + a^4}} \quad (4.23)$$

$$\varphi_2 = \frac{S_L R}{2(a^2 + R^2)} \quad (4.24)$$

$$\varphi_3 = \frac{S_L R}{2a\sqrt{a^2 + 4R^2}} \quad (4.25)$$

$$\varphi_4 = \frac{S_L R}{2(c^2 - R^2)} \quad (4.26)$$

Дисковый источник (рис. 4.4)

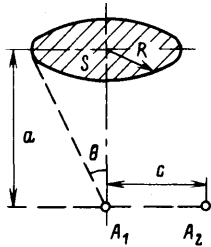


Рис. 4.4

$$\varphi_1 = \frac{S_A}{4} \ln \frac{a^2 + R^2}{a^2} = \frac{S_A}{2} \ln \frac{\sqrt{a^2 + R^2}}{a} = \frac{S_A}{2} \ln \sec \theta. \quad (4.27)$$

$$\varphi_2 = \frac{S_A}{4} \ln \left\{ \frac{a^2 + R^2 - c^2 + \sqrt{R^4 + 2R^2(a^2 - c^2) + (a^2 + c^2)^2}}{2a^2} \right\}. \quad (4.28)$$

Для косинусоидального углового распределения излучения источника $S_A^+(\theta) = S_A^+ (n+1) \cos^n \theta / (2\pi)$ при $n > 0$:

$$\varphi_1 = \frac{(n+1)S_A^+}{n} \left[1 - \left(1 + \frac{R^2}{a^2} \right)^{-n/2} \right]. \quad (4.29)$$

В частном случае формулы (4.29) для косинусоидального источника ($n=1$):

$$\varphi_1 = 2S_A^+ (1 - \cos \theta). \quad (4.30)$$

При $a \gg R$ формула (4.29) переходит в

$$\varphi_1 \approx \frac{(n+1)S_A^+ R^2}{2a^2}. \quad (4.31)$$

Прямоугольный поверхностный источник (рис. 4.5)
Для изотропного источника размерами $h \times l$:

$$\varphi_1 = S_A^+ \Phi(m; n), \quad (4.32)$$

где $m = a/l$, $n = h/l$.

Для других расположений точек детектирования над плоскостью источника поле находится по принципу аддитивности:

$$\varphi_2 = S_A^+ \left[\Phi\left(\frac{a}{l_1}; \frac{h_1}{l_1}\right) + \Phi\left(\frac{a}{l_1}; \frac{h_2}{l_1}\right) + \Phi\left(\frac{a}{l_2}; \frac{h_2}{l_2}\right) + \Phi\left(\frac{a}{l_2}; \frac{h_1}{l_2}\right) \right]; \quad (4.33)$$

$$\varphi_3 = S_A^+ \left[\Phi\left(\frac{a}{l+l_3}; \frac{h+h_3}{l+l_3}\right) - \Phi\left(\frac{a}{l_3}; \frac{h+h_3}{l_3}\right) - \Phi\left(\frac{a}{l+l_3}; \frac{h_3}{l+l_3}\right) + \Phi\left(\frac{a}{l_3}; \frac{h_3}{l_3}\right) \right]. \quad (4.34)$$

Функция $\Phi(m, n)$ приведена в [68, с. 140] и на рис. 4.25.

Для косинусоидального углового распределения излучения источника $S_A^+(\theta) = S_A^+ \cos \theta / \pi$ для источника размерами $h \times l$:

$$\varphi_1 = \frac{S_A^+}{\pi} \arctg \left\{ \frac{hl}{a^2} \left[1 + \left(\frac{h}{a}\right)^2 + \left(\frac{l}{a}\right)^2 \right]^{-1/2} \right\}. \quad (4.35)$$

Для косинусоидального углового распределения излучения источника размерами $h \times l$, где $h_1 = h_2 = h/2$, $l_1 = l_2 = l/2$:

$$\varphi_2 = \frac{4S_A^+}{\pi} \arctg \left\{ \frac{h}{2a} \left[1 + \left(\frac{h}{l}\right)^2 + \left(\frac{2a}{l}\right)^2 \right]^{-1/2} \right\}. \quad (4.36)$$

Цилиндрический поверхностный источник с распределенными на боковой поверхности источниками (рис. 4.6)*

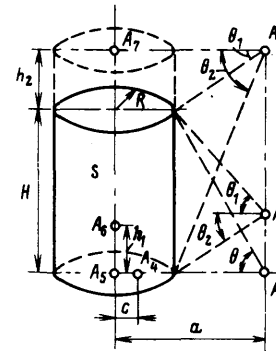


Рис. 4.6

$$\varphi_1 = \frac{S_A R}{2(a+R)} F(\theta, k), \quad (4.37)$$

где $\theta = \arctg \frac{H}{a-R}$, $k = \frac{2\sqrt{aR}}{a+R}$.

$$\varphi_2 = \frac{S_A R}{2(a+R)} [F(\theta_1, k) + F(\theta_2, k)]. \quad (4.38)$$

$$\varphi_3 = \frac{S_A R}{2(a+R)} [F(\theta_2, k) - F(\theta_1, k)]. \quad (4.39)$$

$$\varphi_4 = \frac{S_A R}{2(R-c)} F(\theta, k); \quad \theta = \arctg \frac{H}{R-c}; \quad k = \frac{2\sqrt{cR}}{c+R}. \quad (4.40)$$

* Здесь и ниже в этом параграфе стенки источника прозрачны для излучения.

$$\varphi_5 = \frac{S_A}{2} \operatorname{arctg} \frac{H}{R}. \quad (4.41)$$

$$\varphi_6 = \frac{S_A}{2} \left(\operatorname{arctg} \frac{h_1}{R} + \operatorname{arctg} \frac{H-h_1}{R} \right). \quad (4.42)$$

$$\varphi_7 = \frac{S_A}{2} \left(\operatorname{arctg} \frac{H+h_2}{R} - \operatorname{arctg} \frac{h_2}{R} \right). \quad (4.43)$$

В выражениях (4.37)–(4.40): $F(\theta, k)$ — эллиптический интеграл первого рода ($k = \frac{2\sqrt{aR}}{a+R}$).

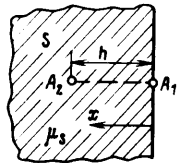


Рис. 4.7

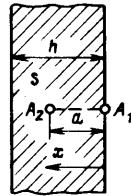


Рис. 4.8

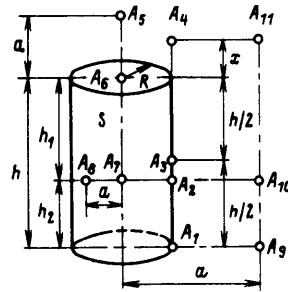


Рис. 4.9

Полубесконечное пространство с различными законами распределения мощности источника по объему (рис. 4.7):

равномерное распределение мощности источника $S_V = \text{const}$:

$$\varphi_1 = \frac{S_V}{2\mu_S}; \quad (4.44)$$

$$\varphi_2 = \frac{S_V}{2\mu_S} [2 - E_2(\mu_S h)]; \quad (4.45)$$

распределение мощности источника по закону $S_V(x) = S_{V_0} e^{\pm \alpha x}$:

$$\varphi_2 = \frac{S_{V_0}}{2\mu_S} e^{\pm \alpha h} \left[F_1\left(\mu_S h; \mp \frac{\alpha}{\mu_S}\right) + F_1\left(\infty; \pm \frac{\alpha}{\mu_S}\right) \right], \quad (4.46)$$

значения функции $F_1(t; \pm \beta)$ приведены в [66] на с. 74–75; в виде функции $\psi_1(t_1, \alpha)$ и в работе [69] на с. 21–24;

распределение мощности источника по закону $S_V(x) = S_{V_0}(1 \pm mx)$, $m \geq 0$:

$$\varphi_1 = \frac{S_{V_0}}{2\mu_S} \left(1 + \frac{m}{2\mu_S} \right); \quad (4.47)$$

$$\varphi_2 = \frac{S_{V_0}}{2\mu_S} \left[2(1 \pm mh) - E_2(\mu_S h) \pm \frac{m}{\mu_S} E_3(\mu_S h) \right]. \quad (4.48)$$

Источник — бесконечная пластина с различными законами распределения мощности источника по объему (рис. 4.8):

равномерное распределение мощности источника $S_V = \text{const}$:

$$\varphi_1 = \frac{S_V}{2\mu_S} [1 - E_2(\mu_S h)]; \quad (4.49)$$

$$\varphi_2 = \frac{S_V}{2\mu_S} [2 - E_2(\mu_S a) - E_2[\mu_S(h-a)]]; \quad (4.50)$$

распределение мощности источника по закону $S_V(x) = S_{V_0} e^{\pm \alpha x}$:

$$\varphi_2 = \frac{S_{V_0}}{2\mu_S} e^{\pm \alpha a} \left\{ F_1\left(\mu_S a; \mp \frac{\alpha}{\mu_S}\right) + F_1\left[\mu_S(h-a); \frac{\pm \alpha}{\mu_S}\right] \right\}, \quad (4.51)$$

значения функции $F_1(t; \alpha)$ приведены в [66] на с. 74 и 75 и в [69] на с. 21–24;

распределение мощности источника по закону $S_V(x) = S_{V_0}(1 + mx)$, $m \geq 0$:

$$\varphi_1 = \frac{S_{V_0}}{2\mu_S} \left\{ 1 - (1 + mh)E_2(\mu_S h) + \frac{m}{\mu_S} [0,5 - E_3(\mu_S h)] \right\}; \quad (4.52)$$

$$\varphi_2 = \frac{S_{V_0}}{2\mu_S} \left\{ 2(1 + ma) - E_2(\mu_S a) - (1 + mh)E_2[\mu_S(h-a)] + \frac{m}{\mu_S} E_3(\mu_S a) - \frac{m}{\mu_S} E_3[\mu_S(h-a)] \right\}. \quad (4.53)$$

Цилиндрический объемный непоглощающий источник (без учета самопоглощения) (рис. 4.9)

$$\varphi_1 = \frac{S_V h}{2} \beta (h/R). \quad (4.54)$$

$$\varphi_2 = \frac{S_V}{2} \left[h_1 \beta \left(\frac{h_1}{R} \right) + h_2 \beta \left(\frac{h_2}{R} \right) \right]. \quad (4.55)$$

$$\varphi_3 = \frac{S_V h}{2} \beta \left(\frac{h}{2R} \right). \quad (4.56)$$

$$\varphi_4 = \frac{S_V}{2} \left[(h+x) \beta \left(\frac{h+x}{R} \right) - x \beta \left(\frac{x}{R} \right) \right]. \quad (4.57)$$

$$\varphi_5 = \frac{S_V}{4} \left\{ (h+a) \left[\ln \left[1 + \frac{R^2}{(h+a)^2} \right] + \frac{2R}{h+a} \operatorname{arctg} \frac{h+a}{R} \right] - a \left[\ln \left(1 + \frac{R^2}{a^2} \right) + \frac{2R}{a} \operatorname{arctg} \frac{a}{R} \right] \right\}. \quad (4.58)$$

$$\varphi_6 = \frac{S_V h}{4} \left[\ln \left(1 + \frac{R^2}{h^2} \right) + \frac{2R}{h} \operatorname{arctg} \frac{h}{R} \right]. \quad (4.59)$$

$$\varphi_7 = \frac{S_V}{4} \left\{ h_1 \left[\ln \left(1 + \frac{R^2}{h_1^2} \right) + \frac{2R}{h_1} \operatorname{arctg} \frac{h_1}{R} \right] + h_2 \left[\ln \left(1 + \frac{R^2}{h_2^2} \right) + \frac{2R}{h_2} \operatorname{arctg} \frac{h_2}{R} \right] \right\}. \quad (4.60)$$

В формулах (4.54) — (4.57):

$$\beta\left(\frac{h}{R}\right) = \frac{1}{2} \left[1 + \ln \frac{1 + \sqrt{1 + 4(R/h)^2}}{2} + 2\frac{R}{h} - \sqrt{1 + 4(R/h)^2} \right].$$

Рассчитанные значения функции $\beta(h/R)$ приведены в [69] на с. 36, где $\beta(h/R)$ обозначено через $\varphi_A(h/R)$.

$$\varphi_9 = \left(\frac{S_V R}{2\pi} \right) G_1\left(\frac{h}{R}, \frac{a}{R}\right). \quad (4.61)$$

$$\varphi_{10} = \frac{S_V R}{2\pi} \left[G_1\left(\frac{h_1}{R}, \frac{a}{R}\right) + G_1\left(\frac{h_2}{R}, \frac{a}{R}\right) \right]. \quad (4.62)$$

$$\varphi_{11} = \frac{S_V R}{2\pi} \left[G_1\left(\frac{h+x}{R}, \frac{a}{R}\right) - G_1\left(\frac{x}{R}, \frac{a}{R}\right) \right]. \quad (4.63)$$

Функция $G_1(k, p, \mu_S R)$ приведена в [65] на с. 234—235 и в [69] на с. 27—30, принять $b_1 = 0$.

$$k = \frac{h}{R}; p = \frac{a}{R}; \mu_S R = 0.$$

Цилиндрический объемный поглощающий источник (с учетом самопоглощения) (рис. 4.9)

$$\varphi_5 = \frac{S_V}{2\mu_S} Z\left(\frac{R}{h}, \frac{a}{h}, \mu_S h\right). \quad (4.64)$$

Функция $Z\left(\frac{R}{h}, \frac{a}{h}, \mu_S h\right)$ приведена в [69] на с. 31—34, принять $b_1 = 0$

$$\varphi_6 = \frac{S_V}{2\mu_S} G(\mu_S h, \mu_S R). \quad (4.65)$$

При $\mu_S h \geq 3; \mu_S R \geq 3$

$$\varphi_6 \approx \frac{S_V}{2\mu_S}. \quad (4.66)$$

$$\varphi_7 = \frac{S_V}{2\mu_S} [G(\mu_S h_1, \mu_S R) + G(\mu_S h_2, \mu_S R)]. \quad (4.67)$$

При $\mu_S h_1 \geq 3, \mu_S h_2 \geq 3, \mu_S R \geq 3$

$$\varphi_7 \approx \frac{S_V}{\mu_S}. \quad (4.68)$$

Верхняя оценка для точки A_8 :

$$\varphi_8^{\text{верх}} = \frac{S_V}{4\mu_S} \left\{ G[\mu_S h_1; \mu_S(R+a)] + G[\mu_S h_2; \mu_S(R+a)] + G[\mu_S h_1; \mu_S \sqrt{R^2 - a^2}] + G[\mu_S h_2; \mu_S(R-a)] \right\}. \quad (4.69)$$

Нижняя оценка для точки A_8 :

$$\varphi_8^{\text{ниж}} = \frac{S_V}{4\mu_S} \left\{ G[\mu_S h_1; \mu_S \sqrt{R^2 - a^2}] + G[\mu_S h_2; \mu_S \sqrt{R^2 - a^2}] + \right.$$

$$\left. + G[\mu_S h_1; \mu_S(R-a)] + G[\mu_S h_2; \mu_S(R-a)] \right\}. \quad (4.70)$$

Значения функций $G(\mu_S h; b)$ приведены в [69] на с. 38, где $\mu_S R$ обозначено через b .

$$\varphi_9 = \frac{S_V R}{2\pi} G(k, p, \mu_S R), \quad (4.71)$$

где $k = h/R, p = a/R \geq 1,25$.

$$\varphi_{10} = \frac{S_V R}{2\pi} [G(k', p, \mu_S R) + G(k'', p, \mu_S R)], \quad (4.72)$$

где $k' = h_1/R, k'' = h_2/R, p = a/R \geq 1,25$.

Функция $G(k, p, \mu_S R)$ приведена в [69] на с. 27—30, принять $b_1 = 0$.
Источник — усеченный конус (рис. 4.10)

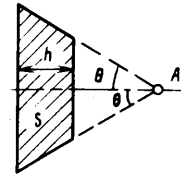


Рис. 4.10

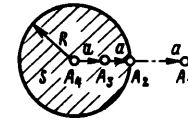


Рис. 4.11

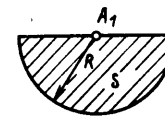


Рис. 4.12

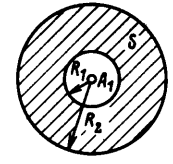


Рис. 4.13

$$\varphi_1 = \frac{S_V}{2\mu_S} [1 - \cos\theta - E_2(\mu_S h) + \cos\theta E_2(\mu_S h \sec\theta)]. \quad (4.73)$$

При $\mu_S h \rightarrow \infty$

$$\varphi_1 = \frac{S_V}{2\mu_S} (1 - \cos\theta). \quad (4.74)$$

Шаровой объемный непоглощающий источник (рис. 4.11)

$$\varphi_1 = \varphi_2 = \frac{S_V}{4a} \left[2Ra - (a^2 - R^2) \ln \left(\frac{a+R}{a-R} \right) \right]. \quad (4.75)$$

$$\varphi_2 = \varphi_3 = \frac{S_V}{4a} \left[2Ra + (R^2 - a^2) \ln \left(\frac{a+R}{R-a} \right) \right]. \quad (4.76)$$

$$\varphi_4 = \frac{S_V R}{2}. \quad (4.77)$$

Шаровой объемный поглощающий источник (рис. 4.11)

$$\varphi_1 = \frac{S_V R}{\pi} G(p, \mu_S R), \quad (4.78)$$

где $p = \frac{a+R}{R}$.

Значения функции $G(p, \mu_S R)$ приведены в [69] на с. 41.

$$\varphi_3 = \frac{S_V}{\mu_S} \left\{ 1 - \frac{e^{-b_4}}{2} - \frac{e^{-b_5}}{2} - \frac{1}{4\mu_S a} [e^{-b_4}(1+b_4) - e^{-b_5}(1+b_5)] \right\} +$$

$$+ \frac{b_4 b_5}{4\mu_s a} [E_1(b_4) - E_1(b_5)] \}, \quad (4.79)$$

где $b_4 = \mu_s(R - a)$; $b_5 = \mu_s(R + a)$.

$$\varphi_2 = \frac{S_V}{2\mu_s} \left[1 - \frac{1}{2\mu_s R} (1 - e^{-2\mu_s R}) \right]. \quad (4.80)$$

$$\varphi_4 = \frac{S_V}{\mu_s} (1 - e^{-\mu_s R}). \quad (4.81)$$

При $\mu_s R > 3$

$$\varphi_4 \approx \frac{S_V}{\mu_s}. \quad (4.82)$$

Полушаровой объемный поглощающий источник (рис. 4.12)

$$\varphi_1 = \frac{S_V}{2\mu_s} (1 - e^{-\mu_s R}). \quad (4.83)$$

Объемный источник в виде шарового поглощающего слоя (рис. 4.13)

$$\varphi_1 = \frac{S_V}{\mu_s} [1 - \exp(-\mu_s(R_2 - R_1))]. \quad (4.84)$$

ФОРМУЛЫ ДЛЯ РАСЧЕТОВ ПОЛЕЙ ИЗЛУЧЕНИЙ ИСТОЧНИКОВ РАЗЛИЧНЫХ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ФОРМ ЗА ЗАЩИТОЙ

Точечный изотропный источник (рис. 4.14)

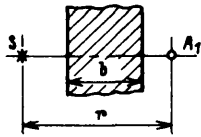


Рис. 4.14

$$\varphi_1 = \frac{S}{4\pi r^2} e^{-b}. \quad (4.85)$$

Для радионуклида активностью A мощность дозиметрической величины \dot{G} за защитой толщиной b длин свободного пробега

$$\dot{G} = \frac{A\Gamma_G}{r^2} e^{-b}, \quad (4.86)$$

где Γ_G — гамма-постоянная по мощности данной дозиметрической величины \dot{G} .

Для бесконечной геометрии защиты

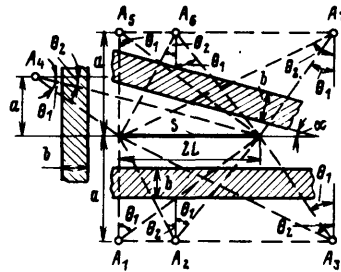


Рис. 4.15

Линейный источник (рис. 4.15)

$$\varphi_1 = \frac{S_L}{4\pi a} F(\theta_1; b) \quad (4.87)$$

Частный случай: полубесконечный линейный источник ($\theta_1 = \frac{\pi}{2}$):

$$\varphi_1 = \frac{S_L}{4\pi a} F\left(\frac{\pi}{2}; b\right). \quad (4.88)$$

$$\varphi_2 = \frac{S_L}{4\pi a} [F(\theta_1; b) + F(\theta_2; b)]. \quad (4.89)$$

Частные случаи к формуле (4.89):

a) $\theta_1 = \theta_2$; $\varphi_2 = \frac{S_L}{2\pi a} F(\theta_1; b)$; (4.90)

b) бесконечный линейный источник ($\theta_1 = \theta_2 = \frac{\pi}{2}$):

$$\varphi_2 = \frac{S_L}{2\pi a} F\left(\frac{\pi}{2}; b\right). \quad (4.91)$$

$$\varphi_3 = \frac{S_L}{4\pi a} [F(\theta_2; b) - F(\theta_1; b)]. \quad (4.92)$$

$$\varphi_4 = \frac{S_L}{4\pi a} [F(\theta_1; b) - F(\theta_2; b)]. \quad (4.93)$$

$$\varphi_5 = \frac{S_L}{4\pi a} [F(\theta_1 + \alpha; b) - F(\alpha; b)]. \quad (4.94)$$

$$\varphi_6 = \frac{S_L}{4\pi a} [F(\theta_1 + \alpha; b) + F(\theta_2 - \alpha; b)]. \quad (4.95)$$

$$\varphi_7 = \frac{S_L}{4\pi a} [F(\theta_2 - \alpha; b) - F(\theta_1 - \alpha; b)]. \quad (4.96)$$

Функция $F(\theta; b) = \int_0^{\theta} e^{-b \sec \theta'} d\theta'$ ($b \geq 0$, $0 \leq \theta \leq \frac{\pi}{2}$) — интегральный

секанс (значения приведены в приложении).

Круговой линейный непоглощающий источник (рис. 4.16)

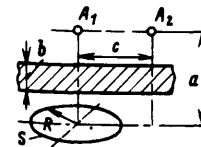


Рис. 4.16

$$\varphi_1 = \frac{S_L R}{2(R^2 + a^2)} e^{-\frac{b\sqrt{R^2 + a^2}}{a}} \quad (4.97)$$

$$\varphi_2 = \frac{S_L}{2\pi R} Q_1\left(\frac{a}{R}, \frac{c}{R}, b\right). \quad (4.98)$$

Значения функций $Q_1\left(\frac{a}{R}, \frac{c}{R}, b\right)$ приведены в [66] на с. 24—29.

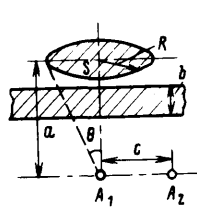


Рис. 4.17

Дисковый источник (рис. 4.17) (расположен параллельно защите)

$$\varphi_1 = \frac{S_A}{2} [E_1(b) - E_1(b \sec \theta)]. \quad (4.99)$$

$$\varphi_2 = \frac{S_A}{2\pi} V_1\left(\frac{a}{R}, \frac{c}{R}, b\right). \quad (4.100)$$

Значения функции $V_1\left(\frac{a}{R}, \frac{c}{R}, b\right)$ приведены в [65] на с. 202—203 и в [66] на с. 50—54.

Для косинусоидального углового распределения излучения источника $S_A^+(\theta) = S_A^+ \cos \theta / \pi$:

$$\varphi_1 = 2S_A^+ [E_2(b) - \cos \theta E_2(b \sec \theta)]. \quad (4.101)$$

Прямоугольный источник (рис. 4.18) (расположен параллельно защите)

$$\varphi_1 = \frac{S_A}{4\pi} \left[\frac{\pi}{2} E_1(b) - J_1(m; n; b) - J_2(m; n; b) \right]; \quad (4.102)$$

$$\varphi_1 = \frac{S_A}{4\pi} \Phi(m; n; b), \quad (4.103)$$

где $n = h/l$, $m = l/a$.

Значения функций $J_1(m; n; b)$ и $J_2(m; n; b)$ приведены в [69] на с. 14—15, функции $\Phi(m; n; b)$ — в [65] на с. 19—22.

Для других расположений точки детектирования над плоскостью источника поле находится по принципу аддитивности подобно тому, как это сделано для прямоугольного источника без защиты [см. формулы (4.33) и (4.34)].

Бесконечный плоский источник (расположен параллельно барьерной защите толщиной b) (рис. 4.17 при $R \rightarrow \infty$ или рис. 4.18 при $l \rightarrow \infty$, $h \rightarrow \infty$)

$$\varphi_1 = \frac{S_A}{2} E_1(b). \quad (4.104)$$

Для косинусоидального углового распределения излучения источника $S_A^+(\theta) = S_A^+ \cos \theta / \pi$:

$$\varphi_1 = 2S_A^+ E_2(b). \quad (4.105)$$

Цилиндрический поверхностный с равномерно распределенными на боковой поверхности источниками (рис. 4.19)

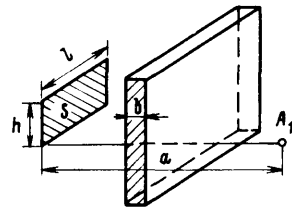


Рис. 4.18

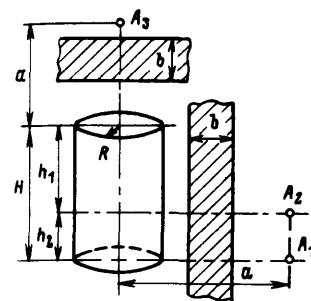


Рис. 4.19

$$\varphi_1 = \frac{S_A}{2\pi} W(k, p, b), \quad (4.106)$$

где $k = \frac{H}{R}$, $p = \frac{a}{R}$.

$$\varphi_2 = \frac{S_A}{2\pi} \left[W\left(\frac{h_1}{R}, \frac{a}{R}, b\right) + W\left(\frac{h_2}{R}, \frac{a}{R}, b\right) \right] \quad (4.107)$$

Значения функций $W(k, p, b)$ приведены в [69] на с. 16—19 и в [66] на с. 64—73.

$$\varphi_3 = \frac{S_A}{2} [F(\theta_1; b) - F(\theta_2; b)], \quad (4.108)$$

где $\theta_1 = \arctg \frac{R}{a}$; $\theta_2 = \arctg \frac{R}{H+a}$;
 $F(\theta; b)$ — интегральный секанс.

Полубесконечное пространство с различными законами распределения мощности источника по объему (рис. 4.20):

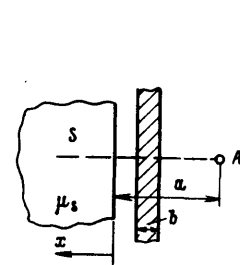


Рис. 4.20

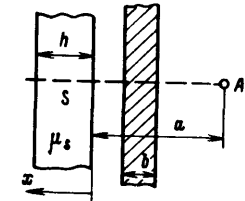


Рис. 4.21

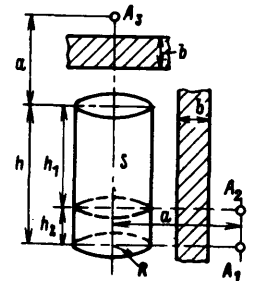


Рис. 4.22

равномерное распределение мощности источника $S_V = \text{const}$:

$$\varphi_1 = \frac{S_V}{2\mu_s} E_2(b); \quad (4.109)$$

распределение мощности источника по закону $S_V(x) = S_{V_0} e^{\pm \alpha x}$:

$$\varphi_1 = \frac{S_{V_0}}{2\mu_s} e^{\pm \frac{\alpha b}{\mu_s}} \left[F_1\left(\infty, \pm \frac{\alpha}{\mu_s}\right) - F_1\left(b, \pm \frac{\alpha}{\mu_s}\right) \right], \quad (4.110)$$

где функция $F_1(t, a) = \int_0^t e^{\alpha x} E_1(x) dx$ приведена в [69] на с. 21—24 и в

виде функций $\Psi_1(t, a) \equiv F_1(t, a)$ в [66] на с. 74—75;

распределение мощности источника по закону $S_V(x) = S_{V_0}(1 + mx)$ $m \geq 0$:

$$\varphi_1 = \frac{S_{V_0}}{2\mu_s} \left[E_2(b) + \frac{m}{\mu_s} E_3(b) \right]. \quad (4.111)$$

Источник — бесконечная пластина с различными законами распределения мощности источника по объему (рис. 4.21):
 равномерное распределение мощности источника по закону $S_V = \text{const}$:

$$\varphi_1 = \frac{S_V}{2\mu_S} [E_2(b) - E_2(b + \mu_S h)]; \quad (4.112)$$

распределение мощности источника по закону $S_V(x) = S_{V_0} e^{\pm \alpha x}$:

$$\varphi_1 = \frac{S_{V_0}}{2\mu_S} e^{\mp \frac{\alpha b}{\mu_S}} \left\{ F_1 \left[(b + \mu_S h), \pm \frac{\alpha}{\mu_S} \right] - F_1 \left(b, \pm \frac{\alpha}{\mu_S} \right) \right\}, \quad (4.113)$$

значения функции $F_1(t, a)$ приведены в [69] на с. 21—24;
 распределение мощности источника по закону $S_V(x) = S_{V_0}(1 + mx)$, $m \geq 0$:

$$\varphi_1 = \frac{S_{V_0}}{2\mu_S} \left\{ E_2(b) - (1 + mh)E_2(b + \mu_S h) + \frac{m}{\mu_S} [E_3(b) - E_3(b + \mu_S h)] \right\}. \quad (4.114)$$

Цилиндрический объемный источник (рис. 4.22)

$$\varphi_1 = \frac{S_V R}{2\pi} G(k, p, \mu_S R, b), \quad (4.115)$$

где $k = h/R$; $p = a/R \geq 1,25$.

$$\varphi_2 = \frac{S_V R}{2\pi} [G(k', p, \mu_S R, b) + G(k'', p, \mu_S R, b)], \quad (4.116)$$

где $k' = h_1/R$; $k'' = h_2/R$; $p = a/R \geq 1,25$.
 При $h_1 = h_2 = h/2$

$$\varphi_2 = \frac{S_V R}{\pi} G(k, p, \mu_S R, b), \quad (4.117)$$

где $k = h/(2R)$.

$$\varphi_3 = \frac{S_V}{2\mu_S} Z \left(\frac{R}{h}, \frac{a}{h}, \mu_S h, b \right). \quad (4.118)$$

Значение функции $G(k, p, \mu_S R, b)$ приведено на с. 27—30, значение функции $Z \left(\frac{R}{h}, \frac{a}{h}, \mu_S h, b \right)$ — на с. 31—34 в [69].

Если на поверхности стенок объемного цилиндрического источника адсорбирована активность, то поле излучения такого источника определяется как сумма полей излучения данного объемного источника и поверхностного цилиндрического источника с адсорбированной активностью.

Источник — усеченный конус (рис. 4.23)

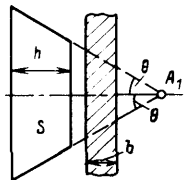


Рис. 4.23

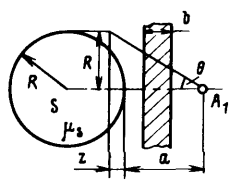


Рис. 4.24

$$\varphi_1 = \frac{S_V}{2\mu_S} \{ E_2(b) - \cos\theta E_2(b \sec\theta) - E_2(b + \mu_S h) + \cos\theta E_2[(b + \mu_S h) \sec\theta] \}. \quad (4.119)$$

При $\mu_S h \rightarrow \infty$

$$\varphi_1 = \frac{S_V}{2\mu_S} [E_2(b) - \cos\theta E_2(b \sec\theta)]. \quad (4.120)$$

Шар поглощающий (рис. 4.24)

$$\varphi_1 = \frac{2S_V R}{3} \{ E_1(\mu_S z + b) - E_1[(\mu_S z + b) \sec\theta] \}, \quad (4.121)$$

значение «толщины самопоглощения» z определяется из рисунка на с. 42 в [69].

$$\varphi_1 = \frac{S_V(a+R)}{\pi} M \left(\frac{a+R}{R}, \mu_S R, b \right), \quad (4.122)$$

значения функции $M \left(\frac{a+R}{R}, \mu_S R, b \right)$ приведены в [66] на с. 102—104.

На рис. 4.25 приведена функция $\Phi(m, n)$ [68, с. 140]

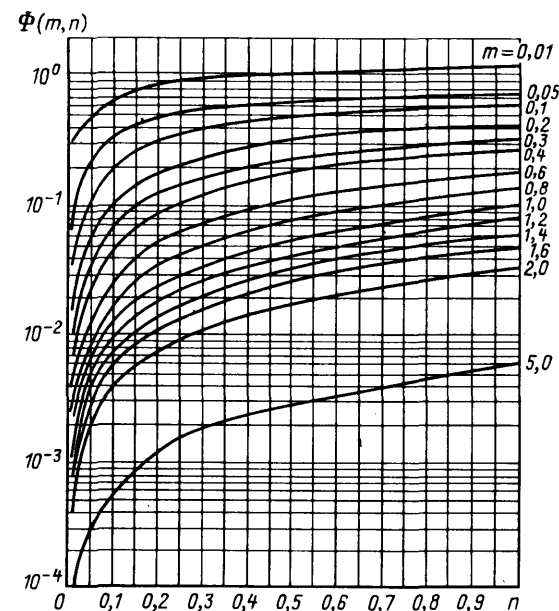


Рис. 4.25. Значения функции $\Phi(m, n)$

§ 4.3. Преобразования для расчетов полей излучений

Переходы от поля излучения источников одних форм, размеров и угловых распределений излучения к полям других источников называют преобразованиями [9, 67, 69—72].

Различают *прямые и обратные преобразования*. Под прямыми понимают преобразования от элементарных источников к более сложным, под обратными — от сложных к более элементарным. Преобразования для источников одного класса по угловому распределению излучения называют геометрическими.

Наиболее элементарным является *точечный мононаправленный источник (тонкий луч)*, поле излучения которого для моноэнергетического источника единичной мощности в бесконечной гомогенной среде обозначим функцией ослабления $G_0^{T.M}$ ($R, E, \Omega; R_0, E_0, \Omega_0$)*, где R, E, Ω характеризуют координаты детектора R, Ω и энергию регистрируемого излучения E , а R_0, E_0, Ω_0 — энергию и координаты источника.

Используя принцип аддитивности, можно рассчитать при помощи преобразований функцию ослабления в гомогенной среде любого поверхностного источника S (R_0, E_0, Ω_0), по формуле

$$G[R, E, \Omega; S(R_0, E_0, \Omega_0)] = \iiint G_0^{T.M}(R, E, \Omega; R_0, E_0, \Omega_0) \times S(R_0, E_0, \Omega_0) dS_0 dE_0 d\Omega_0. \quad (4.123)$$

В табл. 4.1. собраны формулы, широко используемые для прямых и обратных геометрических преобразований в бесконечной гомогенной среде для класса изотропных источников. В таблице и приводимых ниже формулах (4.133) — (4.135) обозначено: G — любая характеристика поля излучения (плотность потока, плотность потока энергии, мощность дозы и т. д.); верхние индексы указывают геометрию (т — точечный, д — дисковый, с — сферический, п — плоский) и угловое распределение излучения источника (и — изотропное, м — мононаправленное); нижний индекс 0 указывает, что характеристика отнесена к единичной мощности точечного источника или к единичной поверхностной мощности протяженного источника; S, S_A — мощность точечного источника и поверхностная мощность протяженного источника (предполагается постоянной по всей поверхности источника); z — расстояние от точечного изотропного источника, или от точечного мононаправленного источника вдоль направления распространения излучений, или по перпендикуляру от центра дискового источника, или по перпендикуляру от плоского источника, или от центра сферического источника (табл. 4.1).

Запишем ниже формулы трех широко используемых в практических задачах преобразований:

а) от поля точечного мононаправленного источника к полю точечного изотропного источника

$$G^{T.M}(z) = 2\pi S \int_0^\pi G_0^{T.M}(z, \theta) \sin\theta d\theta; \quad (4.133)$$

б) от поля точечного мононаправленного источника к полю плоско-го мононаправленного источника

* Здесь R, Ω, R_0, Ω_0 — векторные величины

Таблица 4.1

Формулы геометрических преобразований в классе изотропных источников

Исходный источник (геометрия) с известной функцией ослабления	Источник, для которого определяется функция ослабления			сферический радиусом R^*
	точечный	дисковый радиусом a	плоский	
Точечный	—	$G^{D.M}(z) = 2\pi S_A \times \int_z^{\infty} \frac{G_0^{T.M}(r) r dr}{\sqrt{z^2 + a^2}} \quad (4.124)$	$G^{P.M}(z) = 2\pi S_A \int_z^{\infty} G_0^{T.M}(r) \times r dr \quad (4.125)$	$G^{S.M}(z) = 2\pi S_A \frac{R}{z} \times \int_{z-R}^{z+R} G_0^{T.M}(r) r dr \quad (4.126)$
Дисковый радиусом a	$G_0^{T.M}(z) = \sum_{v=0}^{\infty} B(z^2 + va^2)^{1/2}, \quad (4.127)$ где $B(z) = \frac{dG_0^{T.M}(z)}{dz} \quad (4.128)$	—	$G^{P.M}(z) = \sum_{v=0}^{\infty} G_0^{T.M} \left[(z^2 + va^2)^{1/2} \right] \quad (4.128)$	Если $R \geq a^2/(4z)$, то $G^{S.M}(z) = \frac{RS_A}{z} \sum_{v=0}^{n-1} G_0^{T.M} \left[(z - R^2 + va^2)^{1/2} \right],$ где $n = 4zR/a^2 \quad (4.129)$
Плоский	$G_0^{T.M}(z) = \frac{1}{2\pi S_A z} \times \frac{dG_0^{T.M}(z)}{dz} \quad (4.130)$	$G^{D.M}(z) = S_A \left\{ G_0^{T.M}(z) - G_0^{T.M} \left[(z^2 + a^2)^{1/2} \right] \right\} \quad (4.131)$	—	$G^{S.M}(z) = S_A \frac{R}{z} \left[G_0^{T.M}(z - R) - G_0^{T.M}(z + R) \right] \quad (4.132)$

* Сферический поверхностный источник внутри заполнен материалом той же среды, в которую он помещен.

$$G^{n,m}(z) = 2\pi S_A \int_0^{\infty} G_0^{n,m}(z, h) h dh; \quad (4.134)$$

в) от поля дискового мононаправленного источника радиусом a к полю плоского мононаправленного источника

$$G^{n,m}(z) = (S_A / (\pi a^2)) \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} G_0^{n,m}(x, y, z) dx dy. \quad (4.135)$$

В формулах (4.133) — (4.135) θ — угол, отсчитываемый от направления распространения излучения точечного мононаправленного источника; h отсчитывается по перпендикуляру к направлению распространения излучения точечного мононаправленного источника.

Заметим, что негомогенность или (и) небесконечность среды сводят на нет полезность методики для практических расчетов.

§ 4.4. МЕТОДЫ УЧЕТА РАССЕЯННОГО В ИСТОЧНИКЕ И ЗАЩИТЕ ИЗЛУЧЕНИЯ

Формулы в § 4.2 приведены для характеристик поля только нерассеянного излучения. В реальных задачах необходимо учитывать вклад рассеянного излучения в материале источника и (или) защиты. Методы учета рассеянного излучения для моноэнергетических источников излучения рассмотрены ниже в настоящем параграфе [9, 65, 69, 73, 74]. Для немоноэнергетических источников расчеты можно выполнить с использованием принципа аддитивности.

Учитывая, что приведенные в § 4.2 расчетные формулы обычно на практике используют для источников фотонов, методы учета рассеянного излучения рассмотрены в настоящем параграфе применительно к источникам фотонного излучения.

МЕТОДЫ УЧЕТА РАССЕЯННОГО В ИСТОЧНИКЕ ИЗЛУЧЕНИЯ

1. *Использование факторов накопления точечных изотропных источников в бесконечной геометрии в аналитическом виде.* Наиболее широкое применение нашли экспоненциальные представления в виде формул (5.45) и (5.46) и представление Бергера по формуле (5.47).

Если использовать экспоненциальное представление Тейлора в виде (5.45)

$$B = A_1 \exp(-\alpha_1 \mu_S r) + (1 - A_1) \exp(-\alpha_2 \mu_S r), \quad (4.136)$$

то решение задачи с учетом рассеянного излучения сводится к выражению того же вида, что и без учета рассеянной радиации. В этом удобство использования приближений вида (4.136) или (5.46).

Например, плотность потока энергии фотонов любого протяженного источника можно выразить с использованием формулы (4.136) в виде

$$I = A_1 G(\mu'_S r) + (1 - A_1) G(\mu''_S r), \quad (4.137)$$

где $\mu'_S = \mu_S (1 + \alpha_1)$, $\mu''_S = \mu_S (1 + \alpha_2)$, а $G(\mu_S r)$ — функция, описывающая плотность потока энергии нерассеянного излучения для данного источника (приводится в § 4.2).

Использование фактора накопления в виде формулы Бергера

$$B = 1 + a \mu_S r \exp(b \mu_S r) \quad (4.138)$$

также удобно при определении поля излучения с учетом рассеянного излучения, хотя и приводит к выражениям, отличным от соответствующих выражений в § 4.2.

Например, если плотность потока энергии излучения в центре шарового источника радиусом R без учета рассеянного излучения описывается формулой, подобной формуле (4.81), т. е.

$$I = (S_V E_0 / \mu_S) [1 - \exp(-\mu_S R)], \quad (4.139)$$

где S_V — объемный выход частиц моноэнергетического источника с энергией E_0 , то учет рассеянного излучения по формуле Бергера для энергетического фактора накопления приводит к выражению вида

$$I = \frac{S_V E_0}{\mu_S} \left\{ [1 - \exp(-\mu_S R)] + \frac{a}{(1-b)^2} [(1 - \mu_S(1-b)R) \exp(-\mu_S(1-b)R)] \right\}. \quad (4.140)$$

Для точек детектирования, находящихся вне источника, в формулу (4.137) множителем следует ввести поправку δ в фактор накопления в бесконечной геометрии на барьерность среды (см. § 5.3).

2. *Гамма-метод для полубесконечных и бесконечных объемных равномерных источников.* Показано, что с учетом рассеянного в среде излучения на поверхности полубесконечного равномерного изотропного источника [9]:

$$\varphi = S_V / (2\mu_{en,S}); \quad (4.141)$$

$$\dot{K} = 2\pi \Gamma_K A_V / \mu_{en,S}; \quad (4.142)$$

внутри бесконечного равномерного источника:

$$\varphi = S_V / \mu_{en,S}; \quad (4.143)$$

$$\dot{K} = 4\pi \Gamma_K A_V / \mu_{en,S}. \quad (4.144)$$

где $\mu_{en,S}$ — коэффициент поглощения энергии фотонов в материале источника; Γ_K — керма-постоянная. Выбор единиц величин Γ_K и A_V в формулах (4.142) и (4.144) определяет единицу мощности воздушной кермы \dot{K} .

3. При сравнении формулы (4.141) с формулой (4.44) видно, в частности, что для оценочного учета рассеянной в протяженном источнике радиации можно заменить коэффициент μ_S в формулах § 4.2 на коэффициент $\mu_{en,S}$. Подобные оценки можно выполнять только в отсутствие защитных экранов между источником и детектором.

МЕТОДЫ УЧЕТА РАССЕЯННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В ЗАЩИТЕ

1. *Использование фактора накопления для данного протяженного источника.* В этом случае фактор накопления вводится в соответствующие формулы § 4.2 в виде множителя.

2. *Использование факторов накопления точечных изотропных источников в бесконечной геометрии в виде формулы Тейлора* (5.45)

или формулы Бергера (5.47). Если использовать формулу (5.45), то плотность потока энергии фотонов за защитой от протяженного источника можно выразить в виде

$$I = [A_1 W(\mu'd) + (1 - A_1) W(\mu''d)] \delta, \quad (4.145)$$

где $\mu' = \mu(1 + \alpha_1)$, $\mu'' = \mu(1 + \alpha_2)$, $W(\mu d)$ — функция, описывающая плотность потока энергии нерассеянного излучения для данного источника за защитой (см. § 4.2); δ — поправка фактора накопления в бесконечной геометрии на барьерность среды.

Использование формулы Бергера приводит к выражениям, отличным от выражений, описывающих поле нерассеянного излучения, но также удобно при решении практических задач.

Например, если плотность потока энергии в бесконечной среде на расстоянии d от плоского изотропного источника с поверхностной мощностью S_A без учета рассеянного излучения описывается формулой, подобной (4.104), т. е.

$$I = (S_A E_0 / 2) E_1(\mu d), \quad (4.146)$$

то учет рассеянного излучения по формуле Бергера для энергетического фактора накопления приводит к выражению вида

$$I = (S_A E_0 / 2) \{ E_1(\mu d) + [a \exp\{-\mu(1-b)d\} / (1-b)] \}. \quad (4.147)$$

3. *Метод эквивалентной толщины ослабления [73]*. Эквивалентная толщина ослабления μl представляет собой такую толщину защиты μl от излучений точечного источника, которая обеспечивает равное по значению ослабление нерассеянного излучения от протяженного источника защитой толщиной μd . Тогда, если через $W(\mu d)$ и $W(\mu d = 0)$ обозначить поля нерассеянного излучения заданного протяженного источника с защитой и без нее и определить μl из соотношения

$$\ln [W(\mu d = 0) / W(\mu d)] = \mu l, \quad (4.148)$$

то фактор накопления для протяженного источника может быть выбран равным фактору накопления точечного источника с эквивалентной толщиной ослабления μl вместо μd .

Для решения реальных задач полезна также рекомендация работы [73]: при наличии защиты для моноэнергетического источника рассеянное в источнике излучение можно не учитывать с погрешностью 20 %, если толщина защиты превышает 1 длину свободного пробега (д. с. п.) в свинце, 2,5 д. с. п. в железе или 3 д. с. п. в бетоне.

Глава 5

ЗАЩИТА ОТ ФОТОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

§ 5.1. СЕЧЕНИЯ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ФОТОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ С ВЕЩЕСТВОМ

Основные парциальные процессы взаимодействия фотонов с веществом в диапазоне энергий до 10 МэВ следующие:

1. *Фотоэлектрическое поглощение*, при котором атом поглощает фотон и испускает электрон. Находящийся в возбужденном состоянии атом при переходе в основное состояние испускает флуоресцентное излучение или электроны Оже. Эффект наиболее важен в области низких энергий фотонов.

2. *Когерентное рассеяние на связанном электроном* — процесс, при котором фотон отклоняется на небольшой угол от своего первоначального направления без потери энергии. Эффект наиболее важен в области низких энергий фотонов.

3. *Некогерентное рассеяние на связанном электроном*, при котором фотон рассеивается атомным электроном с передачей части энергии электрону, достаточной, чтобы вырвать электрон из атома. Этот процесс наиболее вероятен в области энергий примерно от 200 кэВ до 5 МэВ.

4. *Образование пар*, приводящее к поглощению фотона и образованию пары электрон—позитрон. Образованные электрон и позитрон производят ионизацию среды, частично их энергия тратится на образование тормозного излучения. Замедлившись, позитрон аннигилирует с образованием новых фотонов, возможна также аннигиляция позитронов в полете. Эффект наиболее важен в области высоких энергий.

Полное сечение взаимодействия фотона

$$\sigma_{tot} = \sigma_{coh} + \sigma_{incoh} + \sigma_{ph} + \sigma_{pp}, \quad (5.1)$$

где σ_{coh} , σ_{incoh} , σ_{ph} , σ_{pp} — сечения когерентного рассеяния (coherent scattering), некогерентного рассеяния (incoherent scattering), фотоэлектрического поглощения (photoelectric effect) и образования пар (pair production) соответственно.

Если использовать написание индексов при сечениях на русском языке, то вместо выражения (5.1) можно записать

$$\sigma_{пол} = \sigma_{ког} + \sigma_{нк} + \sigma_{ф} + \sigma_{п}, \quad (5.2)$$

где $\sigma_{ког}$, $\sigma_{нк}$, $\sigma_{ф}$, $\sigma_{п}$ — сечения когерентного рассеяния, некогерентного рассеяния, фотоэлектрического поглощения и образования пар соответственно,

Таким образом, в результате взаимодействия фотонов с веществом часть их энергии преобразуется в кинетическую энергию заряженных частиц, часть — в энергию вторичного фотонного излучения.

При указанных процессах взаимодействия появляется следующее вторичное фотонное излучение: а) рассеянные в процессе когерентного и некогерентного рассеяния фотоны; б) аннигиляционное излучение, обусловленное комбинацией замедленных до низких энергий позитронов, образованных в эффекте образования пар, и аннигиляцией позитронов в полете; в) флуоресцентное излучение, обусловленное переходом электронов на вакантные места в электронной оболочке; г) тормозное излучение, образующееся при замедлении фотоэлектронов, электронов и позитронов пар, комптоновских электронов и электронов Оже.

Вероятность появления после взаимодействия фотонов определяется сечением рассеяния, вероятность появления заряженных частиц — сечением поглощения.

Схематически сечению каждого из указанных выше основных парциальных сечений взаимодействия поставлена в соответствие в левой части рис. 5.1 [75] ширина стрелок. При движении слева направо вдоль стрелок каждого из выделенных процессов взаимодействия на-

правленными вверх ответвлениями стрелок представлены доли потери энергии первичного фотона в выделенном элементарном объеме на образование отмеченных выше источников вторичного фотонного излучения. Остающаяся часть энергии фотона расходуется на образование в выделенном объеме заряженных частиц.

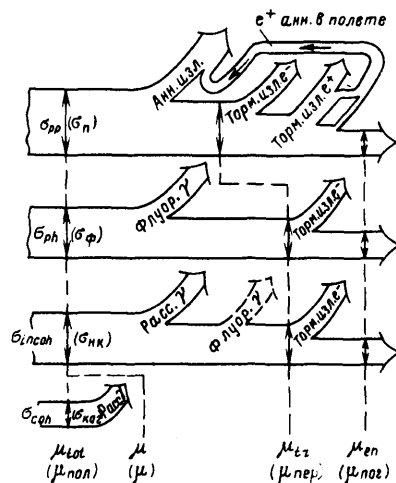


Рис. 5.1. Схематическое представление коэффициентов μ_{tot} , μ , μ_{tr} , μ_{en} [75]. Направленными вверх ответвлениями стрелок показаны доли первичной энергии фотона, теряемой в выделенном объеме на образование рассеянных фотонов (Расс. γ), аннигиляционного излучения (Анн. изл.), тормозного излучения при торможении электронов (Торм. изл. e^-), тормозного излучения при торможении позитронов (Торм. изл. e^+), флуоресцентного излучения (Флуор. γ), аннигиляционного излучения, обусловленного аннигиляцией позитронов в полете (e^+ анн. в полете)

В зависимости от того, утечка каких вторичных фотонов принимается во внимание при определении коэффициентов взаимодействия, выделяются указанные в табл. 5.1 виды полных коэффициентов взаимодействия.

Схематически составляющие парциальных процессов полных коэффициентов показаны на рис. 5.1 при помощи пунктирных линий. В общем виде формулу для расчета полных коэффициентов, приведенных в табл. 5.1 и на рис. 5.1, можно записать в виде

$$\left. \begin{aligned} \mu_{tot,m} &= \\ \mu_m &= \\ \mu_{tr,m} &= \\ \mu_{en,m} &= \end{aligned} \right\} \mu_{coh,m} f_{coh} + \mu_{incoh,m} f_{incoh} + \mu_{ph,m} f_{ph} + \mu_{pp} f_{pp}, \quad (5.3)$$

где коэффициенты f_j для каждого j -го парциального процесса взаимодействия указывают среднюю долю энергии фотона, которая может быть превращена в кинетическую энергию электронов в рассматриваемом объеме.

Наиболее часто в практических задачах физики защиты используются коэффициент ослабления фотонного излучения без учета когерентного рассеяния, которое практически не приводит к изменению характеристик первичных фотонов, коэффициент передачи энергии и коэффициент поглощения энергии фотонов.

Дадим определения этих полных коэффициентов взаимодействия фотонного излучения.

Таблица 5.1
Классификация полных коэффициентов взаимодействия фотонов с веществом

Название коэффициента взаимодействия на русском и английском языках	Перечень вторичных фотонов, утечка которых учтена в коэффициенте	Область применения	Обозначения коэффициентов в настоящей работе		Обозначения линейных коэффициентов с индексами на русском языке
			массовых	линейных	
Коэффициент ослабления (полный коэффициент ослабления) ^{*1} (attenuation coefficient)		Измерения в геометрии узкого пучка	$\mu_{tot,m}$	μ_{tot}	$\mu_{пол}$
Коэффициент ослабления без учета когерентного рассеяния ^{*2}		Задачи радиационной защиты и теории переноса излучений	μ_m	μ	μ
Коэффициент передачи энергии (коэффициент преобразования энергии, коэффициент переноса энергии) ^{*1} (energy-transfer coefficient)	Рассеянные фотоны источника, аннигиляционное и флуоресцентное излучения	Определение кермы	$\mu_{tr,m}$	μ_{tr}	$\mu_{пер}$
Коэффициент поглощения энергии (коэффициент истинного поглощения энергии, коэффициент электронного преобразования) ^{*1} (energy-absorptions coefficient)	Рассеянные фотоны источника, аннигиляционное (в том числе с учетом аннигиляции в полете), флуоресцентное и тормозное излучения	Определение поглощенных доз и радиационных эффектов	$\mu_{en,m}$	μ_{en}	$\mu_{ног}$

^{*1} В скобках указаны также другие используемые в литературе названия коэффициентов.

^{*2} Так как в задачах радиационной защиты и теории переноса излучения обычно используется коэффициент ослабления без учета когерентного рассеяния, часто его называют просто коэффициентом ослабления, опуская указание на то, что он приведен или использован без учета когерентного рассеяния.

Линейный коэффициент ослабления μ — отношение доли dN/N фотонов данной энергии, претерпевших взаимодействие при прохождении элементарного пути dl в среде, к длине этого пути: $\mu = \frac{1}{N} \cdot \frac{dN}{dl}$.

Линейный коэффициент передачи энергии μ_{tr} — отношение доли энергии dW/W падающих фотонов, которая превращается в кинетическую энергию заряженных частиц при прохождении элементарного пути dl в среде, к длине этого пути

$$\mu_{tr} = \frac{1}{W} \cdot \frac{dW}{dl}$$

Линейный коэффициент поглощения энергии μ_{en} — произведение линейного коэффициента передачи энергии μ_{tr} на разность между единицей и долей g энергии вторичных заряженных частиц, переходящей в тормозное излучение в данном веществе: $\mu_{en} = \mu_{tr}(1 - g)$.

Массовые коэффициенты взаимодействия в соответствии с формулой (4.3) представляют собой отношение соответствующих линейных коэффициентов взаимодействия к плотности ρ среды, через которую проходит фотонное излучение:

$$\mu_m = \frac{\mu}{\rho}; \mu_{tr,m} = \frac{\mu_{tr}}{\rho}; \mu_{en,m} = \frac{\mu_{en}}{\rho}$$

Подробная информация о полных и парциальных сечениях взаимодействия фотонов с веществом в широком диапазоне изменения энергии фотонов приводится, например, в [75—81].

Приводимые в табл. 5.2 коэффициенты μ_m см²/г, и μ , см⁻¹, включают в себя коэффициенты взаимодействия, обусловленные фотоэффектом, некогерентным рассеянием на связанных электронах и образованием пар. Величина, обратная коэффициенту ослабления μ , представляет собой среднюю длину свободного пробега фотона в среде и приводится также в табл. 5.2 в виде $l = 1/\mu$, см.

Приводимые в табл. 5.3 коэффициенты $\mu_{en,m}$, см²/г, и μ_{en} , см⁻¹, получены суммированием коэффициентов взаимодействия, обусловленных поглощением при фотоэффекте, поглощением при некогерентном рассеянии на связанных электронах и поглощением в процессе образования пар.

Приведенные в табл. 5.2 и 5.3 массовые коэффициенты взаимодействия выражены в единицах квадратный сантиметр на грамм (см²/г) в соответствии с рекомендациями методических указаний [5]. При этом следует помнить простую связь дольной единицы от исходной единицы СИ (квадратный сантиметр на грамм) и исходной единицы СИ (квадратный метр на килограмм): 1 см²/г = 10⁻¹ м²/кг. Таким образом, если величину в квадратных сантиметрах на грамм (см²/г) умножить на 0,1, получим ее в квадратных метрах на килограмм (м²/кг).

Приведенные в этих таблицах линейные коэффициенты взаимодействия выражены в широко принятой дольной единице от исходной единицы СИ — сантиметр в минус первой степени (см⁻¹), связанной с исходной единицей СИ — метр в минус первой степени (м⁻¹) простым соотношением: 1 см⁻¹ = 10² м⁻¹. Таким образом, если величину в см⁻¹ умножить на 10², получим ее в м⁻¹.

В табл. 5.2 и 5.3 коэффициенты приводятся в зависимости от энергии фотонов для 28 основных элементов, бетона, воды, воздуха

и иодистого натрия, расположенных для удобства пользования в алфавитном порядке.

В области небольших энергий фотонов зависимость сечения фотоэффекта от энергии немонотонна: сечение фотоэффекта претерпевает скачки при энергиях, равных энергиям связи электронов на K-, L-, M- и последующих оболочках атома. Если в рассматриваемый диапазон энергий фотонов (0,01 МэВ ≤ E₀ ≤ 10,0 МэВ) для данного элемента попадают скачки поглощения, то в таблицах для этих энергий приводятся максимальное и минимальное значения сечений, характеризующие скачок. В этом случае в скобке в строке, следующей за строкой, где приводится энергия скачка, указаны тип скачка (K, L₁, L₂, L₃) и химический символ элемента, для которого приводятся значения. Значения коэффициентов взаимодействия для элементов получены из [75] и [77], для воды, воздуха и иодистого натрия они рассчитаны по данным этих работ для отдельных элементов по формуле

$$\mu_m = \sum_i \mu_{m,i} \omega_i \quad (5.4)$$

где μ_m — массовый коэффициент взаимодействия для химического соединения или сложного по химическому составу вещества; $\mu_{m,i}$ — массовый коэффициент i -го компонента с массовой долей ω_i , $\sum_i \omega_i = 1$.

Для бетона приведенные данные заимствованы из [76]*, для других возможных составов бетонов расчеты коэффициентов взаимодействия следует проводить по формуле (5.4) с использованием коэффициентов для различных элементов (табл. 5.2 и 5.3).

Коэффициенты взаимодействия для отдельных энергий фотонов широко распространены нуклидов ¹⁴¹Ce (E₀ = 0,145 МэВ), ²⁰³Hg (E₀ = 0,279 МэВ), ¹⁹⁸Au (E₀ = 0,412 МэВ), ¹³⁷Cs (E₀ = 0,662 МэВ), ⁶⁰Co (E₀ = 1,25 МэВ) и ²⁴Na (E₀ = 2,75 МэВ), приведенные в табл. 5.2 и 5.3, получены интерполяцией.

Для каждого элемента и соединения в табл. 5.2 и 5.3 указываются коэффициент связи микроскопического сечения взаимодействия (см²/атом) с макроскопическим массовым (см²/г), по которому микроскопические сечения взаимодействия пересчитаны к приводимым в таблицах массовым коэффициентам, и плотность элемента и соединения, по которой массовые коэффициенты были пересчитаны к линейным. Если приводимые в таблицах коэффициенты связи домножить на 10⁻²⁴, получим коэффициенты связи между микроскопическими сечениями взаимодействий (б/атом) и макроскопическими массовыми коэффициентами (см²/г). Например, для азота см²/г = 0,043 · 10²⁴ см²/атом = 0,043 · 10²¹ × 10⁻²⁴ б/атом = 0,043 б/атом.

Для газов плотность выбрана при нормальных условиях: при температуре 0 °С и давлении 1013 гПа [1 атм физическая или 760 мм рт. ст.]. Для других температур t , °С, и давления p , гПа, плотность газов ρ , г/см³, рассчитывают по формуле

$$\rho = \frac{\rho_0 p}{[1 + (t/273)] \cdot 1013}$$

где ρ_0 — плотность газа при 0 °С и давлении 1013 гПа, г/см³. Например, при давлении 1013 гПа и $t = 20$ °С плотность воздуха $\rho = 0,001205$ г/см³.

* В расчетах принята следующая массовый состав бетона: Н — 0,0056; О — 0,4983; Na — 0,0171; Mg — 0,0024; Al — 0,0456; Si — 0,3158; S — 0,0012; К — 0,0192; Ca — 0,0826; Fe — 0,0122.

Таблица 5.2

Массовый μ_m и линейный μ коэффициенты ослабления и длина свободного пробега l для различных материалов в зависимости от энергии фотонного излучения.
Коэффициенты приводятся без учета когерентного рассеяния

E_0 , МэВ	Азот [75] $\text{см}^2/\text{г} = 0,043 \cdot 10^{24} \text{ см}^2/\text{атом};$ $\rho = 1,2505 \cdot 10^{-3} \text{ г}/\text{см}^3$			Алюминий [77] $\text{см}^2/\text{г} = 0,02232 \cdot 10^{24} \text{ см}^2/\text{атом};$ $\rho = 2,70 \text{ г}/\text{см}^3$		
	$\mu_m, \text{см}^2/\text{г}$	$10^{-3} \mu, \text{см}^{-1}$	$l, 10^3 \text{ см}$	$\mu_m, \text{см}^2/\text{г}$	$\mu, \text{см}^{-1}$	$l, \text{см}$
	0,01	3,58	4,48	0,223	25,9	69,9
0,015	1,09	1,36	0,735	7,48	20,2	0,0495
0,02	0,526	0,658	1,52	3,19	8,61	0,116
0,03	0,261	0,326	3,07	1,00	2,70	0,370
0,04	0,202	0,253	3,95	0,493	1,33	0,752
0,05	1,180	0,225	4,44	0,319	0,861	1,16
0,06	0,169	0,211	4,74	0,243	0,656	1,52
0,08	0,156	0,195	5,13	0,181	0,489	2,04
0,1	0,148	0,185	5,40	0,157	0,424	2,36
0,145	0,135	0,169	5,92	0,134	0,362	2,76
0,15	0,133	0,166	6,02	0,132	0,356	2,81
0,2	0,122	0,152	6,58	0,119	0,321	3,12
0,279	0,109	0,136	7,35	0,106	0,286	3,50
0,3	0,106	0,132	7,58	0,103	0,278	3,60
0,4	0,0952	0,119	8,40	0,0917	0,248	4,03
0,412	0,0941	0,118	8,47	0,0907	0,245	4,08
0,5	0,0870	0,109	9,17	0,0839	0,226	4,42
0,6	0,0805	0,101	9,90	0,0774	0,209	4,78
0,662	0,0771	0,0964	10,4	0,0743	0,201	4,98
0,8	0,0707	0,0884	11,3	0,0681	0,184	5,43
1,0	0,0636	0,0795	12,6	0,0612	0,165	6,06
1,25	0,0568	0,0710	14,1	0,0550	0,148	6,76
1,5	0,0518	0,0648	15,4	0,0500	0,135	7,41
2,0	0,0445	0,0556	18,0	0,0431	0,116	8,62
2,75	0,0375	0,0469	21,3	0,0368	0,0994	10,1
3,0	0,0358	0,0448	22,3	0,0355	0,0958	10,4
4,0	0,0308	0,0385	26,0	0,0310	0,0837	11,9
5,0	0,0274	0,0343	29,2	0,0283	0,0764	13,1
6,0	0,0251	0,0314	31,8	0,0266	0,0718	13,9
8,0	0,0221	0,0276	36,2	0,0243	0,0656	15,2
10,0	0,0202	0,0253	39,5	0,0232	0,0626	16,0
E_0 , МэВ	Аргон [75] $\text{см}^2/\text{г} = 0,01508 \cdot 10^{24} \text{ см}^2/\text{атом};$ $\rho = 1,7839 \cdot 10^{-3} \text{ г}/\text{см}^3$			Бериллий [77] $\text{см}^2/\text{г} = 0,066830 \cdot 10^{24} \text{ см}^2/\text{атом};$ $\rho = 1,85 \text{ г}/\text{см}^3$		
	$\mu_m, \text{см}^2/\text{г}$	$10^{-3} \mu, \text{см}^{-1}$	$l, 10^3 \text{ см}$	$\mu_m, \text{см}^2/\text{г}$	$\mu, \text{см}^{-1}$	$l, \text{см}$
	0,1	62,4	111	0,0090	0,517	0,956
0,015	19,2	34,2	0,0292	0,244	0,451	2,22
0,02	8,23	14,7	0,0680	0,188	0,348	2,87
0,03	2,51	4,48	0,223	0,161	0,298	3,36
0,04	1,11	1,98	0,505	0,154	0,285	3,51
0,05	0,625	1,11	0,901	0,149	0,276	3,62
0,06	0,411	0,733	1,36	0,145	0,268	3,73

Продолжение табл. 5.2

E_0 , МэВ	Аргон [75] $\text{см}^2/\text{г} = 0,01508 \cdot 10^{24} \text{ см}^2/\text{атом};$ $\rho = 1,7839 \cdot 10^{-3} \text{ г}/\text{см}^3$			Бериллий [77] $\text{см}^2/\text{г} = 0,066830 \cdot 10^{24} \text{ см}^2/\text{атом};$ $\rho = 1,85 \text{ г}/\text{см}^3$		
	$\mu_m, \text{см}^2/\text{г}$	$10^{-3} \mu, \text{см}^{-1}$	$l, 10^3 \text{ см}$	$\mu_m, \text{см}^2/\text{г}$	$\mu, \text{см}^{-1}$	$l, \text{см}$
	0,08	0,244	0,435	2,30	0,138	0,255
0,1	0,183	0,326	3,07	0,131	0,242	4,13
0,145	0,136	0,243	4,12	0,119	0,220	4,54
0,15	0,133	0,237	4,22	0,118	0,218	4,59
0,2	0,115	0,205	4,88	0,108	0,200	5,00
0,279	0,100	0,178	5,62	0,0968	0,179	5,59
0,3	0,0970	0,173	5,78	0,0942	0,174	5,75
0,4	0,0863	0,154	6,49	0,0849	0,157	6,37
0,412	0,0855	0,152	6,58	0,0840	0,155	6,45
0,5	0,0787	0,140	7,14	0,0775	0,143	6,99
0,6	0,0727	0,130	7,69	0,0715	0,132	7,58
0,662	0,0696	0,124	8,06	0,0683	0,126	7,94
0,8	0,0638	0,114	8,77	0,0628	0,116	8,62
1,0	0,0574	0,102	9,80	0,0565	0,104	9,62
1,25	0,0513	0,0915	10,9	0,0508	0,0940	10,6
1,5	0,0469	0,0837	11,9	0,0459	0,0849	11,8
2,0	0,0407	0,0726	13,8	0,0393	0,0727	13,8
2,75	0,0349	0,0622	16,1	0,0325	0,0601	16,6
3,0	0,0338	0,0603	16,6	0,0313	0,0579	17,3
4,0	0,0302	0,0539	18,6	0,0267	0,0494	20,2
5,0	0,0281	0,0501	20,0	0,0234	0,0433	23,1
6,0	0,0267	0,0476	21,0	0,0212	0,0392	25,5
8,0	0,0252	0,0450	22,2	0,0182	0,0337	29,7
10,0	0,0245	0,0437	22,9	0,0163	0,0302	33,1

E_0 , МэВ	Бетон [76] $\rho = 2,3 \text{ г}/\text{см}^3$			Бор [77] $\text{см}^2/\text{г} = 0,055710 \cdot 10^{24} \text{ см}^2/\text{атом};$ $\rho = 2,535 \text{ г}/\text{см}^3$		
	$\mu_m, \text{см}^2/\text{г}$	$\mu, \text{см}^{-1}$	$l, \text{см}$	$\mu_m, \text{см}^2/\text{г}$	$\mu, \text{см}^{-1}$	$l, \text{см}$
	0,01	26,2	60,3	0,0166	1,07	2,71
0,015	7,98	18,4	0,0543	0,394	0,999	1,00
0,02	3,42	7,87	0,127	0,248	0,629	1,59
0,03	1,08	2,48	0,403	0,180	0,456	2,19
0,04	0,531	1,22	0,820	0,164	0,416	2,40
0,05	0,341	0,784	1,28	0,156	0,395	2,53
0,06	0,259	0,596	1,68	0,151	0,383	2,61
0,08	0,192	0,442	2,26	0,143	0,362	2,76
0,1	0,166	0,382	2,62	0,136	0,345	2,90
0,145	0,139	0,320	3,12	0,124	0,314	3,18
0,15	0,138	0,317	3,15	0,123	0,312	3,20
0,2	0,124	0,285	3,51	0,113	0,286	3,50
0,279	0,110	0,253	3,95	0,101	0,256	3,91
0,3	0,107	0,246	4,06	0,0980	0,249	4,02
0,4	0,0954	0,219	4,57	0,0880	0,223	4,48
0,412	0,0940	0,216	4,63	0,0872	0,221	4,52
0,5	0,0871	0,200	5,00	0,0802	0,203	4,93

Продолжение табл. 5.2

E_0 , МэВ	Бетон [76] $\rho = 2,3 \text{ г/см}^3$			Бор [77] $\text{см}^2/\text{г} = 0,055710 \cdot 10^{24} \text{ см}^2/\text{атом};$ $\rho = 2,535 \text{ г/см}^3$		
	$\mu_m, \text{см}^2/\text{г}$	$\mu, \text{см}^{-1}$	$l, \text{см}$	$\mu_m, \text{см}^2/\text{г}$	$\mu, \text{см}^{-1}$	$l, \text{см}$
0,6	0,0806	0,185	5,40	0,0746	0,189	5,29
0,662	0,0771	0,177	5,65	0,0713	0,181	5,52
0,8	0,0707	0,163	6,13	0,0652	0,165	6,06
1,0	0,0636	0,146	6,85	0,0590	0,150	6,67
1,25	0,0568	0,131	7,63	0,0530	0,134	7,46
1,5	0,0518	0,119	8,40	0,0478	0,121	8,26
2,0	0,0447	0,103	9,71	0,0410	0,104	9,62
2,75	0,0380	0,0874	11,4	0,0345	0,0874	11,4
3,0	0,0364	0,0837	11,9	0,0328	0,0831	12,0
4,0	0,0319	0,0734	13,6	0,0280	0,0710	14,1
5,0	0,0289	0,0665	15,0	0,0247	0,0626	16,0
6,0	0,0269	0,0619	16,2	0,0224	0,0568	17,6
8,0	0,0244	0,0561	17,8	0,0194	0,0492	20,3
10,0	0,0230	0,0529	18,9	0,0175	0,0444	22,5

E_0 , МэВ	Висмут [77] $\text{см}^2/\text{г} = 0,002882 \cdot 10^{24} \text{ см}^2/\text{атом};$ $\rho = 9,78 \text{ г/см}^3$			Вода [75] $\text{см}^2/\text{г} = 0,03344 \cdot 10^{24} \text{ г/молекула};$ $\rho = 1,0 \text{ г/см}^3$		
	$\mu_m, \text{см}^2/\text{г}$	$\mu, \text{см}^{-1}$	$l, \text{см}$	$\mu_m, \text{см}^2/\text{г}$	$\mu, \text{см}^{-1}$	$l, \text{см}$
0,01	128	1250	0,0008	4,99	4,99	0,200
0,01342 ($L_3 \text{ Bi}$)	60,2	589	0,0017	—	—	—
0,015	112	1100	0,0009	1,50	1,50	0,667
0,015714 ($L_2 \text{ Bi}$)	98,8	966	0,0010	—	—	—
0,016391 ($L_1 \text{ Bi}$)	139	1360	0,0007	—	—	—
0,02	125	1220	0,0008	—	—	—
0,03	144	1410	0,0007	—	—	—
0,04	86,5	846	0,0012	0,707	0,707	1,41
0,05	29,7	290	0,0034	0,325	0,325	3,08
0,06	13,9	136	0,0074	0,238	0,238	4,20
0,08	7,61	74,4	0,0134	0,207	0,207	4,83
0,090526 ($K \text{ Bi}$)	4,67	45,7	0,0219	0,192	0,192	5,21
0,1	2,18	21,3	0,0469	0,175	0,175	5,71
0,145	1,58	15,4	0,0649	—	—	—
0,15	7,03	68,8	0,0145	—	—	—
0,2	5,48	53,6	0,0186	0,165	0,165	6,06
0,279	2,27	22,2	0,0452	0,150	0,150	6,67
0,3	1,98	19,4	0,0515	0,148	0,148	6,76
0,4	0,968	9,47	0,106	0,136	0,136	7,35
0,412	0,460	4,50	0,222	0,121	0,121	8,26
0,5	0,386	3,78	0,264	0,118	0,118	8,47
0,6	0,220	2,15	0,465	0,106	0,106	9,43
0,662	0,210	2,05	0,488	0,105	0,105	9,52
0,8	0,154	1,51	0,662	0,0966	0,0966	10,4
1,0	0,119	1,16	0,862	0,0894	0,0894	11,2
	0,105	1,03	0,971	0,0857	0,0857	11,7
	0,0856	0,837	1,19	0,0786	0,0786	12,7
	0,0689	0,674	1,48	0,0706	0,0706	14,2

Продолжение табл. 5.2

E_0 , МэВ	Висмут [77] $\text{см}^2/\text{г} = 0,002882 \cdot 10^{24} \text{ см}^2/\text{атом};$ $\rho = 9,78 \text{ г/см}^3$			Вода [75] $\text{см}^2/\text{г} = 0,03344 \cdot 10^{24} \text{ г/молекула};$ $\rho = 1,0 \text{ г/см}^3$		
	$\mu_m, \text{см}^2/\text{г}$	$\mu, \text{см}^{-1}$	$l, \text{см}$	$\mu_m, \text{см}^2/\text{г}$	$\mu, \text{см}^{-1}$	$l, \text{см}$
1,25	0,0586	0,573	1,74	0,0631	0,0631	15,8
1,5	0,0513	0,502	1,99	0,0575	0,0575	17,4
2,0	0,0452	0,442	2,26	0,0494	0,0494	20,2
2,75	0,0410	0,401	2,49	0,0410	0,0410	24,4
3,0	0,0418	0,409	2,44	0,0397	0,0397	25,2
4,0	0,0418	0,409	2,44	0,0340	0,0340	29,4
5,0	0,0429	0,420	2,38	0,0303	0,0303	33,0
6,0	0,0441	0,431	2,32	0,0277	0,0277	36,1
8,0	0,0464	0,454	2,20	0,0243	0,0243	41,2
10,0	0,0490	0,479	2,09	0,0222	0,0222	45,0

E_0 , МэВ	Водород [75] $\text{см}^2/\text{г} = 0,5975 \cdot 10^{24} \text{ см}^2/\text{атом};$ $\rho = 8,987 \cdot 10^{-5} \text{ г/см}^3$			Воздух [75] $\rho = 1,2928 \cdot 10^{-3} \text{ г/см}^3$		
	$\mu_m, \text{см}^2/\text{г}$	$\mu, 10^5 \text{ см}^{-1}$	$l, 10^5 \text{ см}$	$\mu_m, \text{см}^2/\text{г}$	$\mu, 10^3 \text{ см}^{-1}$	$l, 10^3 \text{ см}$
0,01	0,361	3,24	0,308	4,81	6,22	0,161
0,015	0,365	3,28	0,304	1,45	1,87	0,535
0,02	0,363	3,26	0,306	0,678	0,876	1,14
0,03	0,354	3,18	0,314	0,304	0,393	2,54
0,04	0,344	3,09	0,324	0,219	0,283	3,53
0,05	0,334	3,00	0,333	0,188	0,243	4,12
0,06	0,325	2,92	0,342	0,173	0,224	4,46
0,08	0,309	2,78	0,360	0,158	0,204	4,90
0,1	0,294	2,64	0,378	0,149	0,193	5,18
0,145	0,268	2,41	0,415	0,135	0,174	5,75
0,15	0,265	2,38	0,420	0,133	0,172	5,81
0,2	0,243	2,18	0,458	0,122	0,158	6,33
0,279	0,217	1,95	0,513	0,109	0,141	7,09
0,3	0,211	1,90	0,526	0,106	0,137	7,30
0,4	0,189	1,70	0,588	0,0952	0,123	8,13
0,412	0,187	1,68	0,595	0,0940	0,122	8,20
0,5	0,173	1,55	0,645	0,0869	0,112	8,93
0,6	0,160	1,44	0,694	0,0804	0,104	9,62
0,662	0,153	1,38	0,724	0,0770	0,0995	10,0
0,8	0,140	1,26	0,793	0,0707	0,0914	10,9
1,0	0,126	1,13	0,885	0,0635	0,0821	12,2
1,25	0,113	1,02	0,980	0,0568	0,0734	13,6
1,5	0,103	0,926	1,08	0,0517	0,0668	15,0
2,0	0,0877	0,788	1,27	0,0444	0,0574	17,4
2,75	0,0710	0,638	1,57	0,0365	0,0472	21,2
3,0	0,0692	0,622	1,61	0,0358	0,0463	21,6
4,0	0,0581	0,522	1,92	0,0308	0,0398	25,1
5,0	0,0505	0,454	2,20	0,0275	0,0356	28,1
6,0	0,0450	0,404	2,48	0,0252	0,0326	30,7
8,0	0,0375	0,337	2,97	0,0223	0,0288	34,7
10,0	0,0325	0,292	3,42	0,0204	0,0264	37,9

Продолжение табл. 5.2

E_0 , МэВ	Вольфрам [77] $\text{см}^2/\text{г} = 0,003276 \cdot 10^{24} \text{ см}^2/\text{атом};$ $\rho = 19,3 \text{ г}/\text{см}^3$			Железо [77] $\text{см}^2/\text{г} = 0,01078 \cdot 10^{24} \text{ см}^2/\text{атом};$ $\rho = 7,86 \text{ г}/\text{см}^2$		
	$\mu_m, \text{см}^2/\text{г}$	$\mu, \text{см}^{-1}$	$l, \text{см}$	$\mu_m, \text{см}^2/\text{г}$	$\mu, \text{см}^{-1}$	$l, \text{см}$
0,01	90,1	1740	0,0006	169	1330	0,0008
0,010204	86,8	1680	0,0006	—	—	—
(L_3 W)	233	4500	0,0002	—	—	—
0,011541	164	3160	0,0003	—	—	—
(L_2 W)	230	4440	0,0002	—	—	—
0,012098	203	3920	0,0002	—	—	—
(L_1 W)	233	4500	0,0002	—	—	—
0,015	134	2590	0,0004	56,0	440	0,0023
0,02	62,9	1210	0,0008	25,0	196	0,0051
0,03	21,2	409	0,0024	7,80	61,3	0,0163
0,04	9,73	188	0,0053	3,41	26,8	0,0373
0,05	5,34	103	0,0097	1,81	14,2	0,0704
0,06	3,26	62,9	0,0159	1,11	8,72	0,115
0,069525	2,20	42,5	0,0235	—	—	—
(K W)	10,8	208	0,0048	—	—	—
0,08	7,53	145	0,0069	0,537	4,22	0,237
0,1	4,23	81,6	0,0122	0,331	2,60	0,385
0,145	1,63	31,4	0,0318	0,192	1,51	0,662
0,15	1,50	29,0	0,0345	0,177	1,39	0,719
0,2	0,734	14,2	0,0704	0,135	1,06	0,943
0,279	0,360	6,95	0,144	0,110	0,865	1,16
0,3	0,299	5,77	0,173	0,106	0,833	1,20
0,4	0,178	3,44	0,291	0,0912	0,717	1,39
0,412	0,169	3,26	0,307	0,0900	0,707	1,41
0,5	0,129	2,49	0,402	0,0822	0,646	1,55
0,6	0,103	1,99	0,502	0,0757	0,595	1,68
0,662	0,0930	1,79	0,559	0,0725	0,570	1,75
0,8	0,0770	1,49	0,671	0,0662	0,520	1,92
1,0	0,0636	1,23	0,813	0,0594	0,467	2,14
1,25	0,0550	1,06	0,943	0,0537	0,422	2,37
1,5	0,0491	0,948	1,05	0,0485	0,381	2,62
2,0	0,0432	0,834	1,20	0,0424	0,333	3,00
2,75	0,0403	0,778	1,28	0,0370	0,291	3,44
3,0	0,0400	0,772	1,30	0,0361	0,284	3,52
4,0	0,0400	0,772	1,30	0,0331	0,260	3,85
5,0	0,0406	0,784	1,28	0,0315	0,248	4,03
6,0	0,0416	0,803	1,24	0,0305	0,240	4,17
8,0	0,0439	0,847	1,18	0,0298	0,234	4,27
10,0	0,0465	0,897	1,11	0,0298	0,234	4,27

E_0 , МэВ	Иод [77] $\text{см}^2/\text{г} = 0,004746 \cdot 10^{24} \text{ см}^2/\text{атом};$ $\rho = 4,94 \text{ г}/\text{см}^3$			Иодистый натрий [77] $\text{см}^2/\text{г} = 0,004019 \cdot 10^{24} \text{ см}^2/\text{молекула};$ $\rho = 3,667 \text{ г}/\text{см}^3$		
	$\mu_m, \text{см}^2/\text{г}$	$\mu, \text{см}^{-1}$	$l, \text{см}$	$\mu_m, \text{см}^2/\text{г}$	$\mu, \text{см}^{-1}$	$l, \text{см}$
0,01	158	780	0,0013	136	499	0,0020
0,015	52,2	258	0,0039	44,9	165	0,0061
0,02	23,7	117	0,0085	20,4	74,8	0,0134
0,03	7,69	38,0	0,0263	6,61	24,2	0,0413

Продолжение табл. 5.2

E_0 , МэВ	Иод [77] $\text{см}^2/\text{г} = 0,004746 \cdot 10^{24} \text{ см}^2/\text{атом};$ $\rho = 4,94 \text{ г}/\text{см}^3$			Иодистый натрий [77] $\text{см}^2/\text{г} = 0,004019 \cdot 10^{24} \text{ см}^2/\text{молекула};$ $\rho = 3,667 \text{ г}/\text{см}^3$		
	$\mu_m, \text{см}^2/\text{г}$	$\mu, \text{см}^{-1}$	$l, \text{см}$	$\mu_m, \text{см}^2/\text{г}$	$\mu, \text{см}^{-1}$	$l, \text{см}$
0,03317	5,88	29,0	0,0345	5,06	18,6	0,0538
(K I, NaI)	35,3	174	0,0057	30,0	110	0,0091
0,04	21,5	106	0,0094	18,2	66,7	0,0150
0,05	11,9	58,8	0,0170	10,1	37,0	0,0270
0,06	7,31	36,1	0,0277	6,22	22,8	0,0438
0,08	3,32	16,4	0,0610	2,84	10,4	0,0962
0,1	1,81	8,94	0,112	1,55	5,68	0,176
0,145	0,705	3,48	0,287	0,615	2,26	0,442
0,15	0,641	3,17	0,315	0,563	2,06	0,485
0,2	0,335	1,65	0,606	0,302	1,11	0,901
0,279	0,190	0,939	1,06	0,175	0,642	1,56
0,3	0,163	0,805	1,24	0,154	0,565	1,77
0,4	0,113	0,558	1,79	0,110	0,403	2,48
0,412	0,110	0,543	1,84	0,107	0,392	2,55
0,5	0,0921	0,455	2,20	0,0907	0,332	3,01
0,6	0,0792	0,391	2,56	0,0788	0,289	3,46
0,662	0,0740	0,366	2,73	0,0740	0,271	3,69
0,8	0,0655	0,324	3,09	0,0658	0,241	4,15
1,0	0,0570	0,282	3,55	0,0575	0,211	4,74
1,25	0,0504	0,249	4,02	0,0509	0,187	5,35
1,5	0,0458	0,226	4,42	0,0464	0,170	5,88
2,0	0,0407	0,201	4,98	0,0410	0,150	6,67
2,75	0,0371	0,183	5,46	0,0370	0,136	7,35
3,0	0,0368	0,182	5,49	0,0365	0,134	7,46
4,0	0,0358	0,177	5,65	0,0350	0,128	7,81
5,0	0,0359	0,177	5,65	0,0346	0,127	7,87
6,0	0,0364	0,180	5,56	0,0347	0,127	7,87
8,0	0,0378	0,187	5,35	0,0356	0,130	7,69
10,0	0,0395	0,195	5,13	0,0367	0,134	7,46

E_0 , МэВ	Калий [77] $\text{см}^2/\text{г} = 0,0154 \cdot 10^{24} \text{ см}^2/\text{атом};$ $\rho = 0,87 \text{ г}/\text{см}^3$			Кальций [77] $\text{см}^2/\text{г} = 0,01503 \cdot 10^{24} \text{ см}^2/\text{атом};$ $\rho = 1,55 \text{ г}/\text{см}^3$		
	$\mu_m, \text{см}^2/\text{г}$	$\mu, \text{см}^{-1}$	$l, \text{см}$	$\mu_m, \text{см}^2/\text{г}$	$\mu, \text{см}^{-1}$	$l, \text{см}$
0,01	77,6	67,5	0,0148	91,8	142	0,0070
0,015	24,2	21,0	0,0476	28,8	44,6	0,0224
0,02	10,4	9,05	0,110	12,5	19,4	0,0515
0,03	3,14	2,73	0,366	3,76	5,83	0,172
0,04	1,40	1,22	0,820	1,67	2,59	0,386
0,05	0,778	0,677	1,48	0,921	1,43	0,699
0,06	0,505	0,439	2,28	0,585	0,907	1,10
0,08	0,286	0,249	4,02	0,322	0,499	2,00
0,1	0,209	0,182	5,49	0,228	0,353	2,83
0,145	0,149	0,130	7,69	0,159	0,246	4,06
0,15	0,146	0,127	7,87	0,155	0,240	4,17
0,2	0,125	0,109	9,17	0,130	0,202	4,95
0,279	0,108	0,0940	10,6	0,112	0,174	5,75

Продолжение табл. 5.2

E_0 , МэВ	Калий [77] $\text{см}^2/\text{г} = 0,0154 \cdot 10^{24} \text{ см}^2/\text{атом};$ $\rho = 0,87 \text{ г}/\text{см}^3$			Кальций [77] $\text{см}^2/\text{г} = 0,01503 \cdot 10^{24} \text{ см}^2/\text{атом};$ $\rho = 1,55 \text{ г}/\text{см}^3$		
	$\mu_m, \text{см}^2/\text{г}$	$\mu, \text{см}^{-1}$	$l, \text{см}$	$\mu_m, \text{см}^2/\text{г}$	$\mu, \text{см}^{-1}$	$l, \text{см}$
0,3	0,105	0,0914	10,9	0,108	0,167	5,99
0,4	0,0932	0,0811	12,3	0,0959	0,149	6,71
0,412	0,0920	0,0800	12,5	0,0941	0,146	6,85
0,5	0,0847	0,0737	13,6	0,0872	0,135	7,41
0,6	0,0784	0,0682	14,7	0,0806	0,125	8,00
0,662	0,0753	0,0655	15,3	0,0772	0,120	8,33
0,8	0,0687	0,0598	16,7	0,0706	0,109	9,17
1,0	0,0618	0,0538	18,6	0,0636	0,0986	10,1
1,25	0,0558	0,0485	20,6	0,0572	0,0887	11,3
1,5	0,0505	0,0439	22,8	0,0518	0,0803	12,4
2,0	0,0439	0,0382	26,2	0,0452	0,0701	14,3
2,75	0,0380	0,0331	30,2	0,0395	0,0612	16,3
3,0	0,0366	0,0318	31,4	0,0377	0,0584	17,1
4,0	0,0328	0,0285	35,1	0,0340	0,0527	19,0
5,0	0,0305	0,0265	37,7	0,0317	0,0491	20,4
6,0	0,0291	0,0253	39,5	0,0304	0,0471	21,2
8,0	0,0276	0,0240	41,7	0,0288	0,0446	22,4
10,0	0,0270	0,0235	42,6	0,0282	0,0437	22,9

E_0 , МэВ	Кислород [75] $\text{см}^2/\text{г} = 0,03764 \cdot 10^{24} \text{ см}^2/\text{атом};$ $\rho = 1,42904 \cdot 10^{-3} \text{ г}/\text{см}^3$			Кремний [77] $\text{см}^2/\text{г} = 0,02144 \cdot 10^{24} \text{ см}^2/\text{атом};$ $\rho = 2,35 \text{ г}/\text{см}^3$		
	$\mu_m, \text{см}^2/\text{г}$	$10^{-3} \mu, \text{см}^{-1}$	$l, 10^3 \text{ см}$	$\mu_m, \text{см}^2/\text{г}$	$\mu, \text{см}^{-1}$	$l, \text{см}$
0,01	5,58	7,97	0,125	32,6	76,6	0,0130
0,015	1,65	2,36	0,424	9,78	23,0	0,0435
0,02	0,750	1,07	0,934	4,14	9,73	0,103
0,03	0,321	0,459	2,18	1,29	3,03	0,330
0,04	0,225	0,322	3,10	0,611	1,44	0,694
0,05	0,191	0,273	3,66	0,382	0,898	1,11
0,06	0,175	0,250	4,00	0,281	0,660	1,52
0,08	0,158	0,226	4,42	0,199	0,468	2,14
0,1	0,149	0,213	4,69	0,168	0,395	2,53
0,145	0,135	0,193	5,18	0,139	0,327	3,06
0,15	0,133	0,190	5,26	0,137	0,322	3,10
0,2	0,122	0,174	5,75	0,123	0,289	3,46
0,279	0,109	0,156	6,41	0,109	0,256	3,91
0,3	0,106	0,151	6,62	0,106	0,249	4,02
0,4	0,0953	0,136	7,35	0,0950	0,223	4,48
0,412	0,0942	0,135	7,41	0,0940	0,221	4,52
0,5	0,0870	0,124	8,06	0,0868	0,204	4,90
0,6	0,0805	0,115	8,70	0,0804	0,189	5,29
0,662	0,0772	0,110	9,09	0,0770	0,181	5,52
0,8	0,0708	0,101	9,90	0,0703	0,165	6,06
1,0	0,0636	0,0909	11,0	0,0632	0,148	6,76
1,25	0,0572	0,0817	12,2	0,0570	0,134	7,46
1,5	0,0518	0,0740	13,5	0,0517	0,121	8,26
2,0	0,0446	0,0637	15,7	0,0448	0,105	9,52

Продолжение табл. 5.2

E_0 , МэВ	Кислород [75] $\text{см}^2/\text{г} = 0,03764 \cdot 10^{24} \text{ см}^2/\text{атом};$ $\rho = 1,42904 \cdot 10^{-3} \text{ г}/\text{см}^3$			Кремний [77] $\text{см}^2/\text{г} = 0,02144 \cdot 10^{24} \text{ см}^2/\text{атом};$ $\rho = 2,35 \text{ г}/\text{см}^3$		
	$\mu_m, \text{см}^2/\text{г}$	$10^{-3} \mu, \text{см}^{-1}$	$l, 10^3 \text{ см}$	$\mu_m, \text{см}^2/\text{г}$	$\mu, \text{см}^{-1}$	$l, \text{см}$
2,75	0,0390	0,0557	18,0	0,0394	0,0926	10,8
3,0	0,0360	0,0514	19,4	0,0367	0,0862	11,6
4,0	0,0310	0,0443	22,6	0,0324	0,0761	13,1
5,0	0,0278	0,0397	25,2	0,0296	0,0696	14,4
6,0	0,0255	0,0364	27,5	0,0279	0,0656	15,2
8,0	0,0226	0,0323	31,0	0,0257	0,0604	16,6
10,0	0,0209	0,0299	33,4	0,0244	0,0573	17,4

E_0 , МэВ	Магний [77] $\text{см}^2/\text{г} = 0,02477 \cdot 10^{24} \text{ см}^2/\text{атом};$ $\rho = 1,74 \text{ г}/\text{см}^3$			Медь [77] $\text{см}^2/\text{г} = 0,009478 \cdot 10^{24} \text{ см}^2/\text{атом};$ $\rho = 8,93 \text{ г}/\text{см}^3$		
	$\mu_m, \text{см}^2/\text{г}$	$\mu, \text{см}^{-1}$	$l, \text{см}$	$\mu_m, \text{см}^2/\text{г}$	$\mu, \text{см}^{-1}$	$l, \text{см}$
0,01	20,0	34,8	0,0287	214	1910	0,0005
0,015	5,90	10,3	0,0971	73,1	653	0,0015
0,02	2,50	4,35	0,230	33,2	296	0,0034
0,03	0,817	1,42	0,704	10,4	92,9	0,0108
0,04	0,421	0,732	1,37	4,62	41,2	0,0243
0,05	0,285	0,496	2,02	2,44	21,8	0,0459
0,06	0,225	0,392	2,55	1,48	13,2	0,0758
0,08	0,176	0,306	3,27	0,691	6,17	0,162
0,1	0,156	0,271	3,69	0,410	3,66	0,273
0,145	0,136	0,237	4,22	0,210	1,88	0,532
0,15	0,134	0,233	4,29	0,200	1,79	0,559
0,2	0,121	0,210	4,76	0,143	1,28	0,781
0,279	0,108	0,188	5,32	0,114	1,02	0,980
0,3	0,105	0,183	5,46	0,106	0,946	1,06
0,4	0,0941	0,164	6,10	0,0908	0,811	1,23
0,412	0,0931	0,162	6,17	0,0895	0,799	1,25
0,5	0,0857	0,149	6,71	0,0815	0,728	1,37
0,6	0,0795	0,138	7,25	0,0748	0,668	1,50
0,662	0,0760	0,132	7,58	0,0714	0,638	1,57
0,8	0,0698	0,121	8,26	0,0651	0,581	1,72
1,0	0,0629	0,109	9,17	0,0584	0,522	1,92
1,25	0,0565	0,0983	10,2	0,0529	0,472	2,12
1,5	0,0513	0,0893	11,2	0,0478	0,427	2,34
2,0	0,0443	0,0771	13,0	0,0419	0,374	2,67
2,75	0,0385	0,0670	14,9	0,0370	0,330	3,03
3,0	0,0359	0,0625	16,0	0,0359	0,320	3,12
4,0	0,0314	0,0546	18,3	0,0332	0,296	3,38
5,0	0,0287	0,0499	20,0	0,0318	0,284	3,52
6,0	0,0268	0,0466	21,4	0,0310	0,277	3,61
8,0	0,0244	0,0424	23,6	0,0305	0,272	3,68
10,0	0,0231	0,0402	24,9	0,0308	0,275	3,64

Продолжение табл. 5.2

E ₀ , МэВ	Молибден [77] см ² /г=0,006277·10 ²⁴ см ² /атом; ρ=9,01 г/см ³			Натрий [77] см ² /г=0,02620·10 ²⁴ см ² /атом; ρ=0,9712 г/см ³		
	μ _m , см ² /г	μ, см ⁻¹	l, см	μ _m , см ² /г	μ, см ⁻¹	l, см
	0,01	82,2	741	0,0013	14,7	14,3
0,015	26,6	240	0,0042	4,32	4,20	0,238
0,02	12,0	108	0,0092	1,85	1,80	0,556
0,02 (K Mo)	12,0	108	0,0092	—	—	—
0,03	81,0	730	0,0014	—	—	—
0,04	27,4	247	0,0040	0,626	0,608	1,64
0,05	12,6	114	0,0088	0,341	0,331	3,02
0,06	6,72	60,5	0,0165	0,241	0,234	4,27
0,08	4,06	36,6	0,0273	0,200	0,194	5,15
0,1	1,83	16,5	0,0606	0,164	0,159	6,29
0,145	1,01	9,10	0,110	0,148	0,144	6,94
0,15	0,413	3,72	0,269	0,131	0,127	7,87
0,2	0,383	3,45	0,290	0,129	0,125	8,00
0,279	0,220	1,98	0,505	0,117	0,114	8,77
0,3	0,145	1,31	0,763	0,104	0,101	9,90
0,4	0,128	1,15	0,870	0,102	0,0991	10,1
0,412	0,0985	0,887	1,13	0,0912	0,0886	11,3
0,5	0,0970	0,874	1,14	0,0900	0,0874	11,4
0,6	0,0847	0,763	1,31	0,0830	0,0806	12,4
0,662	0,0760	0,685	1,46	0,0770	0,0748	13,4
0,8	0,0715	0,644	1,55	0,0738	0,0717	13,9
1,0	0,0646	0,582	1,72	0,0676	0,0656	15,2
1,25	0,0574	0,517	1,93	0,0608	0,0590	16,9
1,5	0,0512	0,461	2,17	0,0550	0,0534	18,7
2,0	0,0466	0,420	2,38	0,0498	0,0484	20,7
2,75	0,0413	0,372	2,69	0,0427	0,0415	24,1
3,0	0,0380	0,342	2,92	0,0365	0,0354	28,2
4,0	0,0365	0,329	3,04	0,0348	0,0338	29,6
5,0	0,0348	0,314	3,18	0,0304	0,0295	33,9
6,0	0,0343	0,309	3,24	0,0275	0,0267	37,4
8,0	0,0343	0,309	3,24	0,0256	0,0249	40,2
10,0	0,0350	0,315	3,17	0,0232	0,0225	44,4
10,0	0,0362	0,326	3,07	0,0218	0,0212	47,2

E ₀ , МэВ	Никель [77] см ² /г=0,01026·10 ²⁴ см ² /атом; ρ=8,9 г/см ³			Олово [77] см ² /г=0,005074·10 ²⁴ см ² /атом; ρ=7,29 г/см ³		
	μ _m , см ² /г	μ, см ⁻¹	l, см	μ _m , см ² /г	μ, см ⁻¹	l, см
	0,01	206	1830	0,0005	134	977
0,015	69,8	621	0,0016	44,2	322	0,0031
0,02	31,4	279	0,0036	19,9	145	0,0069
0,0292 (K Sn)	—	—	—	7,05	51,4	0,0194
0,03	—	—	—	43,3	316	0,0032
0,04	9,91	88,2	0,0113	40,0	292	0,0034
0,05	4,35	38,7	0,0258	18,9	138	0,0072
0,06	2,30	20,5	0,0488	10,3	75,1	0,0133
0,08	1,40	12,5	0,0800	6,29	45,8	0,0218
0,08	0,663	5,90	0,169	2,87	20,9	0,0478

Продолжение табл. 5.2

E ₀ , МэВ	Никель [77] см ² /г=0,01026·10 ²⁴ см ² /атом; ρ=8,9 г/см ³			Олово [77] см ² /г=0,005074·10 ²⁴ см ² /атом; ρ=7,29 г/см ³		
	μ _m , см ² /г	μ, см ⁻¹	l, см	μ _m , см ² /г	μ, см ⁻¹	l, см
	0,1	0,397	3,53	0,283	1,57	11,4
0,145	0,204	1,82	0,549	0,617	4,50	0,222
0,15	0,199	1,77	0,565	0,558	4,07	0,246
0,2	0,146	1,30	0,769	0,298	2,17	0,461
0,279	0,112	0,997	1,00	0,172	1,25	0,800
0,3	0,110	0,979	1,02	0,151	1,10	0,909
0,4	0,0944	0,840	1,19	0,108	0,787	1,27
0,412	0,0930	0,828	1,21	0,105	0,765	1,31
0,5	0,0850	0,756	1,32	0,0888	0,647	1,54
0,6	0,0780	0,694	1,44	0,0776	0,566	1,77
0,662	0,0751	0,668	1,50	0,0728	0,531	1,88
0,8	0,0680	0,605	1,65	0,0649	0,473	2,11
1,0	0,0610	0,543	1,84	0,0568	0,414	2,42
1,25	0,0550	0,490	2,04	0,0505	0,368	2,72
1,5	0,0499	0,444	2,25	0,0458	0,334	2,99
2,0	0,0436	0,388	2,58	0,0407	0,297	3,37
2,75	0,0381	0,339	2,95	0,0373	0,272	3,68
3,0	0,0373	0,332	3,01	0,0365	0,266	3,76
4,0	0,0345	0,307	3,26	0,0355	0,259	3,86
5,0	0,0329	0,293	3,41	0,0353	0,257	3,89
6,0	0,0321	0,286	3,50	0,0357	0,260	3,85
8,0	0,0315	0,280	3,57	0,0369	0,269	3,72
10,0	0,0316	0,281	3,56	0,0385	0,281	3,56

E ₀ , МэВ	Платина [77] см ² /г=0,003087·10 ²⁴ см ² /атом; ρ=21,4 г/см ³			Свинец [77] см ² /г=0,002907·10 ²⁴ см ² /атом; ρ=11,34 г/см ³		
	μ _m , см ² /г	μ, см ⁻¹	l, см	μ _m , см ² /г	μ, см ⁻¹	l, см
	0,01	106	2270	0,0004	123	1390
0,011564 (L ₃ Pt)	73,5	1570	0,0006	—	—	—
0,013035 (L ₃ Pb)	193	4130	0,0002	—	—	—
0,013273 (L ₂ Pt)	—	—	—	62,2	705	0,0014
0,01388 (L ₁ Pt)	131	2800	0,0004	159	1800	0,0006
0,015861 (L ₁ Pb)	183	3920	0,0003	—	—	—
0,015	163	3490	0,0003	—	—	—
0,0152 (L ₂ Pb)	188	4020	0,0002	—	—	—
0,03	154	3300	0,0003	—	—	—
0,04	—	—	—	107	1210	0,0008
0,05	—	—	—	104	1180	0,0008
0,06	—	—	—	146	1660	0,0006
0,078395	—	—	—	131	1480	0,0007
0,08	—	—	—	152	1720	0,0006
0,1	72,8	1560	0,0006	82,8	939	0,0011
0,15	24,8	531	0,0019	28,5	323	0,0031
0,2	11,4	244	0,0041	13,3	151	0,0066
0,3	6,30	135	0,0074	7,24	82,1	0,0122
0,4	3,86	82,6	0,0121	4,48	50,8	0,0197
0,5	1,89	40,4	0,0248	—	—	—

Продолжение табл. 5.2

E_0 , МэВ	Платина [77] $\text{см}^2/\text{г}=0,003087 \cdot 10^{24} \text{ см}^2/\text{атом};$ $\rho=21,4 \text{ г}/\text{см}^3$			Свинец [77] $\text{см}^2/\text{г}=0,002907 \cdot 10^{24} \text{ см}^2/\text{атом};$ $\rho=11,34 \text{ г}/\text{см}^3$		
	$\mu_m, \text{см}^2/\text{г}$	$\mu, \text{см}^{-1}$	$l, \text{см}$	$\mu_m, \text{см}^2/\text{г}$	$\mu, \text{см}^{-1}$	$l, \text{см}$
(K Pt)	8,86	190	0,0053	—	—	—
0,08	8,52	182	0,0055	2,08	23,6	0,0424
0,088004	—	—	—	1,63	18,5	0,0540
(K Pb)	—	—	—	7,32	83,0	0,0120
0,1	4,78	102	0,0098	5,32	60,3	0,0166
0,145	1,91	40,9	0,0244	2,17	24,6	0,0406
0,15	1,71	36,6	0,0273	1,92	21,8	0,0459
0,2	0,836	17,9	0,0559	0,942	10,7	0,0934
0,279	0,400	8,56	0,117	0,410	4,65	0,215
0,3	0,336	7,19	0,139	0,375	4,25	0,235
0,4	0,196	4,19	0,239	0,215	2,44	0,410
0,412	0,190	4,07	0,246	0,205	2,32	0,431
0,5	0,139	2,97	0,337	0,150	1,70	0,588
0,6	0,110	2,35	0,426	0,117	1,33	0,752
0,662	0,0975	2,09	0,478	0,104	1,18	0,847
0,8	0,0806	1,72	0,581	0,0840	0,952	1,05
1,0	0,0658	1,41	0,709	0,0680	0,771	1,30
1,25	0,0564	1,21	0,826	0,0580	0,658	1,52
1,5	0,0497	1,06	0,943	0,0509	0,577	1,73
2,0	0,0438	0,937	1,07	0,0448	0,508	1,97
2,75	0,0420	0,899	1,11	0,0420	0,476	2,10
3,0	0,0407	0,871	1,15	0,0413	0,468	2,14
4,0	0,0407	0,871	1,15	0,0416	0,472	2,12
5,0	0,0417	0,892	1,12	0,0424	0,481	2,08
6,0	0,0426	0,912	1,10	0,0436	0,494	2,02
8,0	0,0451	0,965	1,04	0,0459	0,520	1,92
10,0	0,0475	1,02	0,980	0,0485	0,550	1,82

E_0 , МэВ	Сера [77] $\text{см}^2/\text{г}=0,01878 \cdot 10^{24} \text{ см}^2/\text{атом};$ $\rho=1,96 \text{ г}/\text{см}^3$			Титан [77] $\text{см}^2/\text{г}=0,01257 \cdot 10^{24} \text{ см}^2/\text{атом};$ $\rho=4,5 \text{ г}/\text{см}^3$		
	$\mu_m, \text{см}^2/\text{г}$	$\mu, \text{см}^{-1}$	$l, \text{см}$	$\mu_m, \text{см}^2/\text{г}$	$\mu, \text{см}^{-1}$	$l, \text{см}$
0,01	48,8	95,6	0,0105	109	490	0,0020
0,015	14,8	29,0	0,0345	34,9	157	0,0064
0,02	6,31	12,4	0,0806	15,3	68,8	0,0145
0,03	1,93	3,78	0,264	4,69	21,1	0,0474
0,04	0,883	1,73	0,578	2,06	9,27	0,108
0,05	0,514	1,01	0,990	1,10	4,95	0,202
0,06	0,355	0,696	1,44	0,690	3,10	0,322
0,08	0,229	0,449	2,23	0,360	1,62	0,617
0,1	0,182	0,357	2,80	0,243	1,09	0,917
0,145	0,144	0,282	3,55	0,156	0,702	1,42
0,15	0,141	0,276	3,62	0,151	0,680	1,47
0,2	0,125	0,245	4,08	0,123	0,554	1,80
0,279	0,110	0,216	4,63	0,104	0,468	2,14
0,3	0,107	0,210	4,76	0,100	0,450	2,22
0,4	0,0952	0,186	5,38	0,0886	0,399	2,51
0,412	0,0940	0,184	5,43	0,0870	0,392	2,55

Продолжение табл. 5.2

E_0 , МэВ	Сера [77] $\text{см}^2/\text{г}=0,01878 \cdot 10^{24} \text{ см}^2/\text{атом};$ $\rho=1,96 \text{ г}/\text{см}^3$			Титан [77] $\text{см}^2/\text{г}=0,01257 \cdot 10^{24} \text{ см}^2/\text{атом};$ $\rho=4,5 \text{ г}/\text{см}^3$		
	$\mu_m, \text{см}^2/\text{г}$	$\mu, \text{см}^{-1}$	$l, \text{см}$	$\mu_m, \text{см}^2/\text{г}$	$\mu, \text{см}^{-1}$	$l, \text{см}$
0,5	0,0870	0,170	5,88	0,0804	0,362	2,76
0,6	0,0804	0,158	6,33	0,0742	0,334	2,99
0,662	0,0776	0,152	6,58	0,0715	0,322	3,10
0,8	0,0704	0,138	7,25	0,0651	0,293	3,41
1,0	0,0635	0,124	8,06	0,0586	0,264	3,79
1,25	0,0571	0,112	8,93	0,0528	0,238	4,20
1,5	0,0518	0,102	9,80	0,0478	0,215	4,65
2,0	0,0449	0,0880	11,4	0,0416	0,187	5,35
2,75	0,0390	0,0764	13,1	0,0361	0,162	6,17
3,0	0,0370	0,0725	13,8	0,0351	0,158	6,33
4,0	0,0329	0,0645	15,5	0,0318	0,143	6,99
5,0	0,0304	0,0596	16,8	0,0299	0,134	7,46
6,0	0,0285	0,0559	17,9	0,0288	0,130	7,69
8,0	0,0269	0,0527	19,0	0,0275	0,124	8,06
10,0	0,0259	0,0508	19,7	0,0273	0,123	8,13

E_0 , МэВ	Углерод (графит) [75] $\text{см}^2/\text{г}=0,05014 \cdot 10^{24} \text{ см}^2/\text{атом};$ $\rho=2,25 \text{ г}/\text{см}^3$			Уран [77] $\text{см}^2/\text{г}=0,002530 \cdot 10^{24} \text{ см}^2/\text{атом};$ $\rho=18,7 \text{ г}/\text{см}^3$		
	$\mu_m, \text{см}^2/\text{г}$	$\mu, \text{см}^{-1}$	$l, \text{см}$	$\mu_m, \text{см}^2/\text{г}$	$\mu, \text{см}^{-1}$	$l, \text{см}$
0,01	2,14	4,82	0,207	170	3180	0,0003
0,015	0,689	1,55	0,645	59,7	1120	0,0009
0,01717	—	—	—	42,5	795	0,0012
(L ₃ U)	—	—	—	102	1910	0,0005
0,02	0,369	0,830	1,20	68,0	1270	0,0008
0,020948	—	—	—	60,0	1120	0,0009
(L ₂ U)	—	—	—	85,0	1590	0,0006
0,021759	—	—	—	77,2	1440	0,0007
(L ₁ U)	—	—	—	88,8	1660	0,0006
0,03	0,220	0,495	2,02	39,2	733	0,0014
0,04	0,186	0,419	2,39	18,5	346	0,0029
0,05	0,173	0,389	2,57	10,2	191	0,0052
0,06	0,165	0,371	2,70	6,32	118	0,0085
0,08	0,155	0,349	2,86	2,93	54,8	0,0182
0,1	0,148	0,333	3,00	1,66	31,0	0,0322
0,115606	—	—	—	1,16	21,7	0,0461
(K U)	—	—	—	4,66	87,1	0,0115
0,145	0,134	0,302	3,31	2,70	50,5	0,0198
0,15	0,133	0,299	3,34	2,47	46,2	0,0216
0,2	0,122	0,274	3,65	1,22	22,8	0,0438
0,279	0,109	0,245	4,08	0,580	10,8	0,0926
0,3	0,106	0,238	4,20	0,483	9,03	0,111
0,4	0,0952	0,214	4,67	0,273	5,10	0,196
0,412	0,0940	0,212	4,72	0,260	4,86	0,206
0,5	0,0870	0,196	5,10	0,184	3,44	0,291
0,6	0,0805	0,181	5,52	0,139	2,60	0,385
0,662	0,0771	0,173	5,78	0,124	2,32	0,431
0,8	0,0707	0,159	6,29	0,0959	1,79	0,559

Продолжение табл. 5.2

E_0 , МэВ	Углерод (графит) [75] $\text{см}^2/\text{г} = 0,05014 \cdot 10^{24} \text{ см}^2/\text{атом};$ $\rho = 2,25 \text{ г}/\text{см}^3$			Уран [77] $\text{см}^2/\text{г} = 0,002530 \cdot 10^{24} \text{ см}^2/\text{атом};$ $\rho = 18,7 \text{ г}/\text{см}^3$		
	$\mu_m, \text{см}^2/\text{г}$	$\mu, \text{см}^{-1}$	$l, \text{см}$	$\mu_m, \text{см}^2/\text{г}$	$\mu, \text{см}^{-1}$	$l, \text{см}$
1,0	0,0636	0,143	6,99	0,0754	1,41	0,709
1,25	0,0570	0,128	7,81	0,0630	1,18	0,847
1,5	0,0518	0,116	8,62	0,0536	1,00	1,00
2,0	0,0444	0,100	10,0	0,0468	0,875	1,14
2,75	0,0370	0,0832	12,0	0,0430	0,804	1,24
3,0	0,0356	0,0801	12,5	0,0435	0,813	1,23
4,0	0,0305	0,0686	14,6	0,0433	0,810	1,23
5,0	0,0271	0,0610	16,4	0,0445	0,832	1,20
6,0	0,0247	0,0556	18,0	0,0453	0,847	1,18
8,0	0,0216	0,0486	20,6	0,0481	0,899	1,11
10,0	0,0196	0,0441	22,7	0,0506	0,946	1,06

E_0 , МэВ	Фосфор [77] $\text{см}^2/\text{г} = 0,01944 \cdot 10^{24} \text{ см}^2/\text{атом};$ $\rho = 1,83 \text{ г}/\text{см}^3$			Хром [77] $\text{см}^2/\text{г} = 0,01158 \cdot 10^{24} \text{ см}^2/\text{атом};$ $\rho = 7,14 \text{ г}/\text{см}^3$		
	$\mu_m, \text{см}^2/\text{г}$	$\mu, \text{см}^{-1}$	$l, \text{см}$	$\mu_m, \text{см}^2/\text{г}$	$\mu, \text{см}^{-1}$	$l, \text{см}$
0,01	39,3	71,9	0,0139	137	978	0,0010
0,015	11,8	21,6	0,0463	44,8	320	0,0031
0,02	5,02	9,19	0,109	19,8	141	0,0071
0,03	1,54	2,82	0,355	6,15	43,9	0,0228
0,04	0,715	1,31	0,763	2,67	19,1	0,0524
0,05	0,430	0,787	1,27	1,41	10,1	0,0990
0,06	0,305	0,558	1,79	0,878	6,27	0,159
0,08	0,206	0,381	2,62	0,438	3,13	0,319
0,1	0,169	0,309	3,24	0,282	2,01	0,498
0,145	0,137	0,251	3,98	0,168	1,20	0,833
0,15	0,135	0,247	4,05	0,162	1,16	0,862
0,2	0,120	0,220	4,54	0,128	0,914	1,09
0,279	0,109	0,199	5,02	0,107	0,764	1,31
0,3	0,103	0,188	5,32	0,102	0,728	1,37
0,4	0,0923	0,169	5,92	0,0896	0,640	1,56
0,412	0,0910	0,166	6,02	0,0880	0,628	1,59
0,5	0,0842	0,154	6,49	0,0812	0,580	1,72
0,6	0,0778	0,142	7,04	0,0748	0,534	1,87
0,662	0,0750	0,137	7,30	0,0717	0,512	1,95
0,8	0,0684	0,125	8,00	0,0654	0,467	2,14
1,0	0,0614	0,112	8,93	0,0588	0,420	2,38
1,25	0,0549	0,110	10,0	0,0530	0,378	2,64
1,5	0,0502	0,0919	10,9	0,0480	0,343	2,92
2,0	0,0434	0,0794	12,6	0,0419	0,299	3,34
2,75	0,0369	0,0675	14,8	0,0369	0,263	3,80
3,0	0,0360	0,0659	15,2	0,0356	0,254	3,94
4,0	0,0317	0,0580	17,2	0,0324	0,231	4,33
5,0	0,0292	0,0534	18,7	0,0306	0,218	4,59
6,0	0,0274	0,0501	20,0	0,0295	0,211	4,74
8,0	0,0255	0,0467	21,4	0,0286	0,204	4,90
10,0	0,0245	0,0448	22,3	0,0285	0,203	4,93

Таблица 5.3

Массовый $\mu_{en, m}$ и линейный μ_{en} коэффициенты поглощения энергии для различных материалов в зависимости от энергии фотонного излучения

E_0 , МэВ	Азот [75] $\text{см}^2/\text{г} =$ $= 0,043 \cdot 10^{24} \text{ см}^2/\text{атом};$ $\rho = 1,2505 \cdot 10^{-3} \text{ г}/\text{см}^3$		Алюминий [77] $\text{см}^2/\text{г} =$ $= 0,02232 \cdot 10^{24} \text{ см}^2/\text{атом};$ $\rho = 2,70 \text{ г}/\text{см}^3$		Аргон [75] $\text{см}^2/\text{г} =$ $= 0,01508 \cdot 10^{24} \text{ см}^2/\text{атом};$ $\rho = 1,7839 \cdot 10^{-4} \text{ г}/\text{см}^3$	
	$\mu_{en, m}, \text{см}^2/\text{г}$	$10^{-3} \mu_{en}, \text{см}^{-1}$	$\mu_{en, m}, \text{см}^2/\text{г}$	$\mu_{en}, \text{см}^{-1}$	$\mu_{en, m}, \text{см}^2/\text{г}$	$10^{-3} \mu_{en}, \text{см}^{-1}$
0,01	3,44	4,30	25,4	68,6	60,3	108
0,015	0,942	1,18	7,32	19,8	18,7	33,4
0,02	0,375	0,469	3,06	8,26	7,98	14,2
0,03	0,107	0,134	0,857	2,31	2,36	4,21
0,04	0,0493	0,0616	0,353	0,953	0,980	1,75
0,05	0,0316	0,0395	0,181	0,489	0,497	0,886
0,06	0,0252	0,0315	0,108	0,292	0,288	0,514
0,08	0,0220	0,0275	0,0542	0,146	0,127	0,226
0,1	0,0222	0,0278	0,0373	0,101	0,0729	0,130
0,145	0,0245	0,0306	0,0281	0,0759	0,0385	0,0687
0,15	0,0247	0,0309	0,0277	0,0748	0,0369	0,0658
0,2	0,0266	0,0333	0,0272	0,0734	0,0300	0,0535
0,279	0,0283	0,0354	0,0279	0,0753	0,0279	0,0498
0,3	0,0287	0,0359	0,0281	0,0759	0,0276	0,0492
0,4	0,0295	0,0369	0,0286	0,0772	0,0273	0,0487
0,412	0,0296	0,0370	0,0286	0,0772	0,0272	0,0485
0,5	0,0297	0,0371	0,0290	0,0783	0,0271	0,0483
0,6	0,0296	0,0370	0,0283	0,0764	0,0268	0,0478
0,662	0,0294	0,0368	0,0281	0,0759	0,0266	0,0474
0,8	0,0288	0,0360	0,0277	0,0748	0,0260	0,0464
1,0	0,0279	0,0349	0,0268	0,0724	0,0251	0,0448
1,25	0,0267	0,0334	0,0255	0,0688	0,0239	0,0426
1,5	0,0255	0,0319	0,0243	0,0656	0,0228	0,0407
2,0	0,0234	0,0293	0,0225	0,0608	0,0212	0,0378
2,75	0,0211	0,0264	0,0206	0,0556	0,0196	0,0350
3,0	0,0205	0,0256	0,0202	0,0545	0,0192	0,0342
4,0	0,0186	0,0232	0,0188	0,0508	0,0182	0,0325
5,0	0,0173	0,0216	0,0180	0,0486	0,0177	0,0316
6,0	0,0164	0,0205	0,0175	0,0472	0,0175	0,0312
8,0	0,0151	0,0189	0,0170	0,0459	0,0173	0,0309
10,0	0,0143	0,0179	0,0168	0,0454	0,0174	0,0310
E_0 , МэВ	Бериллий [77] $\text{см}^2/\text{г} =$ $= 0,06683 \cdot 10^{24} \text{ см}^2/\text{атом};$ $\rho = 1,85 \text{ г}/\text{см}^3$		Бетон [76] $\rho = 2,3 \text{ г}/\text{см}^3$		Бор [77] $\text{см}^2/\text{г} =$ $= 0,5571 \cdot 10^{24} \text{ см}^2/\text{атом};$ $\rho = 2,535 \text{ г}/\text{см}^3$	
	$\mu_{en, m}, \text{см}^2/\text{г}$	$\mu_{en}, \text{см}^{-1}$	$\mu_{en, m}, \text{см}^2/\text{г}$	$\mu_{en}, \text{см}^{-1}$	$\mu_{en, m}, \text{см}^2/\text{г}$	$\mu_{en}, \text{см}^{-1}$
0,01	0,392	0,725	25,1	57,7	0,941	2,38
0,015	0,106	0,196	7,65	17,6	0,253	0,641
0,02	0,0444	0,0821	3,21	7,38	0,102	0,258
0,03	0,0180	0,0333	0,910	2,09	0,0331	0,0839
0,04	0,0138	0,0255	0,384	0,883	0,0201	0,0510
0,05	0,0136	0,0252	0,198	0,455	0,0168	0,0426
0,06	0,0145	0,0268	0,117	0,269	0,0165	0,0418
0,08	0,0164	0,0303	0,0591	0,126	0,0176	0,0446
0,1	0,0182	0,0337	0,0407	0,0936	0,0192	0,0487

Продолжение табл. 5.3

E_0 , МэВ	Бериллий [77] $\text{см}^2/\text{г} =$ $= 0,06683 \cdot 10^{24} \text{ см}^2/\text{атом};$ $\rho = 1,85 \text{ г}/\text{см}^3$		Бетон [76] $\rho = 2,3 \text{ г}/\text{см}^3$		Бор [77] $\text{см}^2/\text{г} =$ $= 0,5571 \cdot 10^{24} \text{ см}^2/\text{атом};$ $\rho = 2,535 \text{ г}/\text{см}^3$	
	$\mu_{\text{en}}, \text{м. см}^2/\text{г}$	$\mu_{\text{en}}, \text{см}^{-1}$	$\mu_{\text{en}}, \text{м. см}^2/\text{г}$	$\mu_{\text{en}}, \text{см}^{-1}$	$\mu_{\text{en}}, \text{м. см}^2/\text{г}$	$\mu_{\text{en}}, \text{см}^{-1}$
0,145	0,0211	0,0390	0,0301	0,0693	0,0222	0,0563
0,15	0,0214	0,0396	0,0298	0,0685	0,0224	0,0568
0,2	0,0234	0,0433	0,0286	0,0658	0,0244	0,0618
0,279	0,0250	0,0462	0,0291	0,0669	0,0260	0,0659
0,3	0,0254	0,0470	0,0293	0,0674	0,0264	0,0669
0,4	0,0263	0,0486	0,0298	0,0685	0,0273	0,0692
0,412	0,0264	0,0488	0,0298	0,0685	0,0274	0,0694
0,5	0,0266	0,0492	0,0299	0,0688	0,0275	0,0697
0,6	0,0263	0,0486	0,0296	0,0681	0,0275	0,0697
0,662	0,0260	0,0481	0,0293	0,0674	0,0272	0,0690
0,8	0,0255	0,0472	0,0287	0,0660	0,0265	0,0672
1,0	0,0247	0,0457	0,0278	0,0639	0,0258	0,0654
1,25	0,0236	0,0437	0,0266	0,0612	0,0246	0,0624
1,5	0,0226	0,0418	0,0254	0,0584	0,0235	0,0596
2,0	0,0207	0,0383	0,0236	0,0543	0,0216	0,0548
2,75	0,0187	0,0346	0,0211	0,0485	0,0193	0,0489
3,0	0,0180	0,0333	0,0208	0,0478	0,0188	0,0476
4,0	0,0161	0,0298	0,0194	0,0446	0,0169	0,0428
5,0	0,0148	0,0274	0,0183	0,0421	0,0156	0,0395
6,0	0,0139	0,0257	0,0177	0,0407	0,0148	0,0375
8,0	0,0124	0,0229	0,0170	0,0391	0,0134	0,0340
10,0	0,0116	0,0215	0,0166	0,0382	0,0125	0,0317
E_0 , МэВ	Висмут [77] $\text{см}^2/\text{г} =$ $= 0,002882 \times$ $\times 10^{24} \text{ см}^2/\text{атом};$ $\rho = 9,78 \text{ г}/\text{см}^3$		Вода [75] $\text{см}^2/\text{г} =$ $= 0,03344 \cdot 10^{24} \text{ см}^2/\text{мо-}$ $\text{лекула}; \rho = 1,0 \text{ г}/\text{см}^3$		Водород [75] $\text{см}^2/\text{г} =$ $= 0,5975 \cdot 10^{24} \text{ см}^2/\text{атом};$ $\rho = 8,987 \cdot 10^{-5} \text{ г}/\text{см}^3$	
	$\mu_{\text{en}}, \text{м. см}^2/\text{г}$	$\mu_{\text{en}}, \text{см}^{-1}$	$\mu_{\text{en}}, \text{м. см}^2/\text{г}$	$\mu_{\text{en}}, \text{см}^{-1}$	$\mu_{\text{en}}, \text{м. см}^2/\text{г}$	$\mu_{\text{en}}, 10^{-5} \text{ см}^{-1}$
0,1	128	1250	4,84	4,84	0,00985	0,0885
0,01342 (L_3 Bi)	60,2	589	—	—	—	—
0,015	91,6	896	1,34	1,34	0,0110	0,0988
0,015714 (L_2 Bi)	81,6	798	—	—	—	—
0,016391 (L_1 Bi)	108	1060	—	—	—	—
0,02	98,8	966	—	—	—	—
0,03	112	1100	—	—	—	—
0,04	70,3	688	0,536	0,536	0,0136	0,122
0,05	26,1	255	0,152	0,152	0,0186	0,167
0,06	12,5	122	0,0680	0,0680	0,0232	0,208
0,08	6,97	68,2	0,0415	0,0415	0,0271	0,244
0,090526 (K Bi)	4,29	42,0	0,0315	0,0315	0,0305	0,274
0,1	1,99	19,5	0,0258	0,0258	0,0362	0,325
0,145	1,43	14,0	—	—	—	—
0,15	2,40	23,5	—	—	—	—
0,2	2,21	21,6	0,0254	0,0254	0,0406	0,365
0,279	1,24	12,1	0,0273	0,0273	0,0475	0,427
	1,16	11,3	0,0276	0,0276	0,0481	0,432
	0,637	6,23	0,0297	0,0297	0,0526	0,473
	0,324	3,17	0,0316	0,0316	0,0564	0,507

Продолжение табл. 5.3

E_0 , МэВ	Висмут [77] $\text{см}^2/\text{г} =$ $= 0,002882 \times$ $\times 10^{24} \text{ см}^2/\text{атом};$ $\rho = 9,78 \text{ г}/\text{см}^3$		Вода [75] $\text{см}^2/\text{г} =$ $= 0,03344 \cdot 10^{24} \text{ см}^2/\text{мо-}$ $\text{лекула}; \rho = 1,0 \text{ г}/\text{см}^3$		Водород [75] $\text{см}^2/\text{г} =$ $= 0,5975 \cdot 10^{24} \text{ см}^2/\text{атом};$ $\rho = 8,987 \cdot 10^{-5} \text{ г}/\text{см}^3$	
	$\mu_{\text{en}}, \text{м. см}^2/\text{г}$	$\mu_{\text{en}}, \text{см}^{-1}$	$\mu_{\text{en}}, \text{м. см}^2/\text{г}$	$\mu_{\text{en}}, \text{см}^{-1}$	$\mu_{\text{en}}, \text{м. см}^2/\text{г}$	$10 \mu_{\text{en}}, \text{см}^{-1}$
0,3	0,265	2,59	0,0319	0,0319	0,0570	0,512
0,4	0,147	1,44	0,0328	0,0328	0,0586	0,527
0,412	0,139	1,36	0,0329	0,0329	0,0587	0,528
0,5	0,0988	0,966	0,0330	0,0330	0,0590	0,530
0,6	0,0735	0,719	0,0328	0,0328	0,0588	0,528
0,662	0,0662	0,647	0,0326	0,0326	0,0584	0,525
0,8	0,0498	0,487	0,0320	0,0320	0,0574	0,516
1,0	0,0386	0,378	0,0310	0,0310	0,0556	0,500
1,25	0,0320	0,313	0,0296	0,0296	0,0531	0,477
1,5	0,0280	0,274	0,0283	0,0283	0,0507	0,456
2,0	0,0247	0,242	0,0260	0,0260	0,0465	0,418
2,75	0,0241	0,236	0,0235	0,0235	0,0414	0,372
3,0	0,0239	0,234	0,0228	0,0228	0,0399	0,358
4,0	0,0251	0,245	0,0206	0,0206	0,0352	0,316
5,0	0,0267	0,261	0,0192	0,0192	0,0317	0,285
6,0	0,0280	0,274	0,0180	0,0180	0,0290	0,261
8,0	0,0303	0,296	0,0166	0,0166	0,0252	0,226
10,0	0,0320	0,313	0,0156	0,0156	0,0225	0,202
E_0 , МэВ	Воздух [75] $\rho = 1,2928 \cdot 10^{-3} \text{ г}/\text{см}^3$		Вольфрам [77] $\text{см}^2/\text{г} =$ $= 0,003276 \times$ $\times 10^{24} \text{ см}^2/\text{атом};$ $\rho = 19,3 \text{ г}/\text{см}^3$		Железо [77] $\text{см}^2/\text{г} =$ $= 0,01078 \cdot 10^{24} \text{ см}^2/\text{атом};$ $\rho = 7,86 \text{ г}/\text{см}^3$	
	$\mu_{\text{en}}, \text{м. см}^2/\text{г}$	$10 \mu_{\text{en}}, \text{см}^{-1}$	$\mu_{\text{en}}, \text{м. см}^2/\text{г}$	$\mu_{\text{en}}, \text{см}^{-1}$	$\mu_{\text{en}}, \text{м. см}^2/\text{г}$	$\mu_{\text{en}}, \text{см}^{-1}$
0,01	4,65	6,01	90,1	1740	138	1080
0,010204 (L_3 W)	—	—	86,8	1680	—	—
0,011541 (L_2 W)	—	—	197	3800	—	—
0,012098 (L_1 W)	—	—	142	2740	—	—
0,015	—	—	192	3700	—	—
0,02	—	—	171	3300	—	—
0,03	1,30	1,68	116	2240	49,2	387
0,04	0,527	0,681	56,7	1090	22,6	178
0,05	0,150	0,194	19,7	380	7,21	56,7
0,06	0,0671	0,0867	9,14	176	3,14	24,7
0,08	0,0404	0,0522	5,04	97,3	1,62	12,7
0,1	0,0301	0,0389	3,04	58,7	0,952	7,48
0,069525 (K W)	—	—	2,04	39,4	—	—
0,08	—	—	3,60	69,5	—	—
0,1	0,0239	0,0309	3,16	61,0	0,408	3,21
0,145	0,0232	0,0300	2,24	43,2	0,217	1,70
0,15	0,0247	0,0319	1,06	20,4	0,0850	0,668
0,2	0,0249	0,0322	0,986	19,0	0,0787	0,618
0,279	0,0267	0,0345	0,514	9,92	0,0479	0,376
0,3	0,0284	0,0367	0,261	5,04	0,0361	0,284
0,4	0,0287	0,0371	0,205	3,96	0,0335	0,263
0,412	0,0295	0,0381	0,114	2,20	0,0303	0,238
0,5	0,0295	0,0381	0,111	2,14	0,0301	0,236
0,6	0,0297	0,0384	0,0773	1,49	0,0292	0,230
	0,0295	0,0381	0,0590	1,14	0,0284	0,223

Продолжение табл. 5.3

E_0 , МэВ	Воздух [75] $\rho = 1,2928 \cdot 10^{-3}$ г/см ³		Вольфрам [77] см ² /г = = 0,003276 × × 10 ²⁴ см ² /атом; $\rho = 19,3$ г/см ³		Железо [77] см ² /г = = 0,01078 · 10 ²⁴ см ² /атом; $\rho = 7,86$ г/см ³	
	$\mu_{en, m}$, см ² /г	$10^{-3} \mu_{en, cm}$	$\mu_{en, m}$, см ² /г	$\mu_{en, cm}$	$\mu_{en, m}$, см ² /г	$\mu_{en, cm}$
0,662	0,0294	0,0380	0,0530	1,02	0,0280	0,220
0,8	0,0288	0,0372	0,0419	0,809	0,0272	0,214
1,0	0,0279	0,0361	0,0334	0,645	0,0260	0,204
1,25	0,0266	0,0344	0,0287	0,554	0,0249	0,196
1,5	0,0254	0,0328	0,0257	0,496	0,0238	0,187
2,0	0,0234	0,0302	0,0231	0,446	0,0221	0,174
2,75	0,0212	0,0274	0,0227	0,438	0,0208	0,163
3,0	0,0206	0,0266	0,0226	0,436	0,0205	0,161
4,0	0,0187	0,0242	0,0238	0,459	0,0199	0,156
5,0	0,0174	0,0225	0,0252	0,486	0,0198	0,156
6,0	0,0165	0,0213	0,0266	0,513	0,0200	0,157
8,0	0,0152	0,0196	0,0289	0,558	0,0207	0,163
10,0	0,0144	0,0186	0,0307	0,593	0,0213	0,167
E_0 , МэВ	Иод [77] см ² /г = = 0,004746 × × 10 ²⁴ см ² /атом; $\rho = 4,94$ г/см ³		Иодистый натрий [77] см ² /г = 0,004019 × × 10 ²⁴ см ² /атом; $\rho = 3,667$ г/см ³		Калий [77] см ² /г = = 0,0154 · 10 ²⁴ см ² /атом; $\rho = 0,87$ г/см ³	
	$\mu_{en, m}$, см ² /г	$\mu_{en, cm}$	$\mu_{en, m}$, см ² /г	$\mu_{en, cm}$	$\mu_{en, m}$, см ² /г	$\mu_{en, cm}$
0,01	153	756	132	484	74,2	64,6
0,015	51,2	253	43,9	161	23,4	20,4
0,02	23,2	115	19,9	73,0	10,1	8,79
0,03	7,50	37,0	6,42	23,5	2,96	2,58
0,03317	5,74	28,4	4,92	18,0	—	—
K I и NaI	12,5	61,8	10,7	39,2	—	—
0,04	9,97	49,2	8,47	31,0	1,25	1,09
0,05	6,74	33,3	5,73	21,0	0,639	0,556
0,06	4,62	22,8	3,92	14,4	0,370	0,322
0,08	2,36	11,6	2,00	7,33	0,160	0,139
0,1	1,35	6,67	1,14	4,18	0,0899	0,0782
0,145	0,520	2,57	0,440	1,61	0,0445	0,0387
0,15	0,479	2,37	0,410	1,50	0,0425	0,0370
0,2	0,232	1,15	0,200	0,733	0,0333	0,0290
0,279	0,115	0,568	0,0970	0,356	0,0310	0,0270
0,3	0,0940	0,464	0,0838	0,307	0,0300	0,0261
0,4	0,0574	0,284	0,0529	0,194	0,0296	0,0258
0,412	0,0551	0,272	0,0498	0,183	0,0295	0,0257
0,5	0,0436	0,215	0,0413	0,151	0,0294	0,0256
0,6	0,0365	0,180	0,0352	0,129	0,0290	0,0252
0,662	0,0335	0,165	0,0324	0,119	0,0287	0,0250
0,8	0,0299	0,148	0,0295	0,108	0,0279	0,0243
1,0	0,0264	0,130	0,0265	0,0972	0,0271	0,0236
1,25	0,0240	0,118	0,0242	0,0887	0,0258	0,0224
1,5	0,0227	0,112	0,0229	0,0840	0,0246	0,0214
2,0	0,0210	0,104	0,0212	0,0777	0,0229	0,0199
2,75	0,0208	0,103	0,0207	0,0759	0,0211	0,0184
3,0	0,0206	0,102	0,0205	0,0752	0,0208	0,0181
4,0	0,0213	0,105	0,0208	0,0763	0,0199	0,0173
5,0	0,0224	0,111	0,0217	0,0796	0,0194	0,0169

Продолжение табл. 5.3

E_0 , МэВ	Иод [77] см ² /г = = 0,004746 · 10 ²⁴ см ² /атом; $\rho = 4,94$ г/см ³		Иодистый натрий [77] см ² /г = 0,004019 × × 10 ²⁴ см ² /атом; $\rho = 3,667$ г/см ³		Калий [77] см ² /г = = 0,0154 · 10 ²⁴ см ² /атом; $\rho = 0,87$ г/см ³	
	$\mu_{en, m}$, см ² /г	$\mu_{en, cm}$	$\mu_{en, m}$, см ² /г	$\mu_{en, cm}$	$\mu_{en, m}$, см ² /г	$\mu_{en, cm}$
6,0	0,0235	0,116	0,0225	0,0825	0,0192	0,0167
8,0	0,0254	0,125	0,0240	0,0880	0,0194	0,0169
10,0	0,0270	0,133	0,0252	0,0924	0,0197	0,0171
E_0 , МэВ	Кальций [77] см ² /г = = 0,01503 · 10 ²⁴ см ² /атом; $\rho = 1,55$ г/см ³		Кислород [75] см ² /г = = 0,03764 · 10 ²⁴ см ² /атом; $\rho = 1,42904 \cdot 10^{-3}$ г/см ³		Кремний [77] см ² /г = = 0,02144 · 10 ²⁴ см ² /атом; $\rho = 2,35$ г/см ³	
	$\mu_{en, m}$, см ² /г	$\mu_{en, cm}$	$\mu_{en, m}$, см ² /г	$10^{-3} \mu_{en, cm}$	$\mu_{en, m}$, см ² /г	$\mu_{en, cm}$
0,01	86,6	134	5,45	7,79	32,4	76,1
0,015	27,6	42,8	1,51	2,16	9,60	22,6
0,02	12,0	18,6	0,602	0,860	3,99	9,38
0,03	3,56	5,52	0,169	0,242	1,14	2,68
0,04	1,50	2,32	0,0736	0,105	0,470	1,10
0,05	0,776	1,20	0,0434	0,0620	0,240	0,564
0,06	0,445	0,690	0,0316	0,0452	0,142	0,334
0,08	0,191	0,296	0,0245	0,0350	0,0682	0,160
0,1	0,106	0,164	0,0235	0,0336	0,0442	0,104
0,145	0,0500	0,0775	0,0248	0,0354	0,0305	0,0717
0,15	0,0478	0,0741	0,0250	0,0357	0,0302	0,0710
0,2	0,0361	0,0560	0,0268	0,0383	0,0287	0,0674
0,279	0,0319	0,0494	0,0285	0,0407	0,0292	0,0686
0,3	0,0314	0,0487	0,0288	0,0412	0,0294	0,0691
0,4	0,0305	0,0473	0,0295	0,0422	0,0298	0,0700
0,412	0,0304	0,0471	0,0296	0,0423	0,0298	0,0700
0,5	0,0304	0,0471	0,0297	0,0424	0,0298	0,0700
0,6	0,0299	0,0463	0,0296	0,0423	0,0296	0,0696
0,662	0,0295	0,0457	0,0294	0,0420	0,0294	0,0691
0,8	0,0287	0,0445	0,0289	0,0413	0,0285	0,0670
1,0	0,0278	0,0431	0,0279	0,0399	0,0276	0,0649
1,25	0,0268	0,0415	0,0267	0,0382	0,0269	0,0632
1,5	0,0254	0,0394	0,0255	0,0364	0,0253	0,0594
2,0	0,0237	0,0367	0,0235	0,0336	0,0236	0,0555
2,75	0,0219	0,0339	0,0212	0,0303	0,0213	0,0500
3,0	0,0215	0,0333	0,0206	0,0294	0,0209	0,0491
4,0	0,0206	0,0319	0,0188	0,0269	0,0197	0,0463
5,0	0,0201	0,0312	0,0176	0,0252	0,0188	0,0442
6,0	0,0201	0,0312	0,0167	0,0239	0,0185	0,0435
8,0	0,0203	0,0315	0,0155	0,0222	0,0180	0,0423
10,0	0,0206	0,0319	0,0148	0,0211	0,0179	0,0421
E_0 , МэВ	Магний [77] см ² /г = = 0,02477 · 10 ²⁴ см ² /атом; $\rho = 1,74$ г/см ³		Медь [77] см ² /г = = 0,009478 × × 10 ²⁴ см ² /атом; $\rho = 8,93$ г/см ³		Молибден [77] см ² /г = = 0,006277 · 10 ²⁴ см ² /атом; $\rho = 9,01$ г/см ³	
	$\mu_{en, m}$, см ² /г	$\mu_{en, cm}$	$\mu_{en, m}$, см ² /г	$\mu_{en, cm}$	$\mu_{en, m}$, см ² /г	$\mu_{en, cm}$
0,01	19,8	34,4	152	1360	81,6	735
0,015	5,75	10,0	59,0	527	26,4	238

$$C_2^{n,m} = I_0 e^{-\mu d} \frac{B_3^{n,m} - 1}{2\pi} \left\{ \frac{\theta_2^{n,m} [1 + (\theta_2^{n,m})^2] [1 + (\theta_1^{n,m})^2]}{(\theta_1^{n,m})^2 [1 + (\theta_2^{n,m})^2] (\theta_1^{n,m} - e^{-\pi/2\theta_1^{n,m}}) - (\theta_2^{n,m})^2 [1 + (\theta_1^{n,m})^2]} \times \right. \\ \left. \frac{1}{\times (\theta_2^{n,m} - e^{-\pi/2\theta_2^{n,m}})} \right\}; \quad (5.26)$$

$$C_1^{n,m} = C_2^{n,m} \theta_1^{n,m} / \theta_2^{n,m}; \quad (5.27)$$

для плоского мононаправленного источника при $n=3$ [формула (5.14)]

$$C_3^{n,m} = \frac{B_3^{n,m} - 1}{2\pi} I_0 e^{-\mu d} \left[\frac{\theta_1^{n,m} (\theta_1^{n,m} - e^{-\pi/2\theta_1^{n,m}})}{1 + (\theta_1^{n,m})^2} A - \right. \\ \left. - \frac{\theta_2^{n,m} (\theta_2^{n,m} - e^{-\pi/2\theta_2^{n,m}})}{1 + (\theta_2^{n,m})^2} \left(\frac{A}{\theta_1^{n,m}} + \frac{1}{\theta_3^{n,m}} \right) \theta_2^{n,m} + \right. \\ \left. + \frac{\theta_3^{n,m} (\theta_3^{n,m} - e^{-\pi/2\theta_3^{n,m}})}{1 + (\theta_3^{n,m})^2} \right]^{-1}; \quad (5.28)$$

$$C_2^{n,m} = C_3^{n,m} \left(\frac{A}{\theta_1^{n,m}} + \frac{1}{\theta_3^{n,m}} \right) \theta_2^{n,m}; \quad (5.29)$$

$$C_1^{n,m} = C_3^{n,m} A; \quad (5.30)$$

где

$$A = \frac{\theta_1^{n,m}}{\theta_3^{n,m}} \left[\frac{e^{-\theta_{\text{пер}}/\theta_2^{n,m}}}{\theta_2^{n,m}} - \frac{e^{-\theta_{\text{пер}}/\theta_3^{n,m}}}{\theta_3^{n,m}} \right] \times \\ \times \left[\frac{e^{-\theta_{\text{пер}}/\theta_1^{n,m}}}{\theta_1^{n,m}} - \frac{e^{-\theta_{\text{пер}}/\theta_2^{n,m}}}{\theta_2^{n,m}} \right]^{-1}; \quad (5.31)$$

значения A приведены в табл. 5.12.

для точечного изотропного источника [формула (5.17)]

$$C^{n,m} = I_{\text{нр}}^{n,m} \frac{B_3^{n,m} - 1}{2\pi} \frac{1}{\theta_1^{n,m} (1 - e^{-\pi/2\theta_1^{n,m}}) - \theta_2^{n,m} (1 - e^{-\pi/2\theta_2^{n,m}})}; \quad (5.32)$$

Характеристические углы в формулах (5.26) — (5.32) даны в радианах. Коэффициенты p_1 и p_2 в формуле (5.15) находят из очевидных соотношений:

$$p_1 + p_2 = 1; \quad (5.33)$$

$$I_{\text{нр}}^{n,m}(E_0, d) = p_1 I_{\text{нр}}^{n,m}(E_0, \theta_0 = 0^\circ, d) + p_2 I_{\text{нр}}^{n,m}(E_0, d). \quad (5.34)$$

Соотношение (5.34) записано для плотности потока энергии рассеянного излучения на границе среды.

Решение соотношений (5.33), (5.34) приводит к значениям p_1 и p_2 :

$$p_1 = \frac{(n+1)E_{n+1}(\mu d) - E_1(\mu d)}{e^{-\mu d} - E_1(\mu d)}; \quad (5.35)$$

$$p_2 = 1 - p_1. \quad (5.36)$$

В диапазоне углов $(15-30)^\circ \lesssim \theta \lesssim (60-70)^\circ$ формулы (5.12) и (5.16) ввиду малости второго и третьего членов суммы переходят в хорошо известные в литературе [72, 85-87] и часто используемые зависимости вида

$$I^{n,m}(E_0, \theta_0 = 0^\circ, d, \theta) = C^{n,m} \exp(-\theta/\theta^{n,m}); \quad (5.37)$$

$$I^{n,m}(E_0, d, \theta) = \frac{C^{n,m}}{\sin \theta} \exp(-\theta/\theta^{n,m}), \quad (5.38)$$

где $\theta^{n,m} \approx \theta_1^{n,m}$; $\theta^{n,m} \approx \theta_1^{n,m}$.

При наклонном падении фотонов плоского мононаправленного источника (рис. 5.2, в) в угловом распределении появляется азимутальная асимметрия, растущая с увеличением θ_0 . Максимум в угловом распределении плотности потока энергии рассеянного фотонного излучения наблюдается при углах $\theta_{\text{макс}} \leq \theta_0$. Угловое распределение плотности потока энергии аппроксимируется выражением, подобным (5.12), если угол θ отсчитывать от $\theta_{\text{макс}}$. Значения необходимых для расчетов коэффициентов для этого случая приводятся в [89].

Для гетерогенных барьеров [89] угловая зависимость плотности потока энергии рассеянного γ -излучения для плоских источников при толщине последнего слоя $d \geq (1,5-2,0)/\mu$ имеет ту же форму, что и для гомогенного барьера одинаковой оптической толщины, выполненного из материала последнего слоя защиты. Значения нормировочных множителей при этом следует определять по факторам накопления для гетерогенной защиты (см. § 5.4).

В [85, 86] показано, что зависимость вида (5.38) сохраняется для угловых распределений плотности потока энергии рассеянного фотонного излучения, измеренных в геометрии рис. 5.2, d до значений β , равных, по крайней мере, 65° , если θ изменяется от 10 до 140° .

Пример. Рассчитать угловую плотность потока энергии рассеянного фотонного излучения (плотность потока энергии излучения, покидающего барьер через единичную площадку в единицу времени, в единичный телесный угол) за барьером из железа толщиной 3 д. с. п. в направлении угла $\theta = 30^\circ$, отсчитываемого от нормали к поверхности барьера, для плоского мононаправленного источника фотонов, падающих нормально на поверхность защиты с энергией $E_0 = 0,662$ МэВ, мощностью 10^4 фотон/(см²·с).

Решение. Для предложенной задачи угловую плотность потока энергии рассеянного фотонного излучения вычисляют по формуле (5.13). При этом из табл. 5.12. определяем $\theta_1^{n,m} = 29^\circ = 0,506$ рад; $\theta_2^{n,m} = 9,4^\circ = 0,164$ рад; двойной интерполяцией по μd и E_0 определяем по табл. 5.18 $B_3^{n,m} = 3,74$; линейно экстраполируя поправку на барьерность среды для энергии 0,662 МэВ, из табл. 5.36 определяем $\delta = 0,9$; отсюда $B_{3,\text{бар}}^{n,m} = 3,37$. Определяем по формулам (5.26) и (5.27) нормировочные множители:

$$C_2^{n,m} = 10^4 \cdot 0,661 \cdot e^{-3} \frac{3,37 - 1}{2\pi} \times \\ \times \left[\frac{0,164 (1 + 0,164^2) \times}{0,506^2 (1 + 0,164^2) (0,506 - e^{-\pi/2 \cdot 0,506}) - 0,164^2 (1 + 0,506^2) \times} \right. \\ \left. \frac{\times (1 + 0,506^2)}{\times (0,163 - e^{-\pi/2 \cdot 0,164})} \right] = 229; \\ C_1^{n,m} = 229 \cdot 0,506 / 0,164 = 706$$

По формуле (5.13)

$$I^{n,m}(\theta = 30^\circ) = 706 \exp(-30/29) - 229 \exp(-30/9,4) = 233 \text{ МэВ/(см}^2 \cdot \text{с} \cdot \text{ср)}.$$

Продолжение табл. 5.3

E_0 , МэВ	Магний [77] $\text{см}^2/\text{г} = 0,02477 \cdot 10^{24} \text{см}^2/\text{атом}; \rho = 1,74 \text{ г}/\text{см}^3$		Медь [77] $\text{см}^2/\text{г} = 0,009478 \times 10^{24} \text{см}^2/\text{атом}; \rho = 8,93 \text{ г}/\text{см}^3$		Молибден [77] $\text{см}^2/\text{г} = 0,006277 \times 10^{24} \text{см}^2/\text{атом}; \rho = 9,01 \text{ г}/\text{см}^3$	
	$\mu_{\text{ен. т.}}$, $\text{см}^2/\text{г}$	$\mu_{\text{ен.}}$, см^{-1}	$\mu_{\text{ен. т.}}$, $\text{см}^2/\text{г}$	$\mu_{\text{ен.}}$, см^{-1}	$\mu_{\text{ен. т.}}$, $\text{см}^2/\text{г}$	$\mu_{\text{ен.}}$, см^{-1}
0,02	2,37	4,12	28,2	252	11,9	107
0,02 (К Мо)	—	—	—	—	11,9	107
0,03	0,674	1,17	9,34	83,4	34,3	309
0,04	0,275	0,478	4,17	37,2	16,8	151
0,05	0,141	0,245	2,19	19,6	8,85	79,7
0,06	0,0862	0,150	1,29	11,5	5,08	45,8
0,08	0,0458	0,0797	0,556	4,96	3,19	28,7
0,1	0,0332	0,0578	0,293	2,62	1,48	13,3
0,145	0,0275	0,0478	0,109	0,973	0,810	7,30
0,15	0,0272	0,0473	0,102	0,911	0,290	2,61
0,2	0,0272	0,0473	0,0576	0,514	0,271	2,44
0,279	0,0284	0,0494	0,0390	0,348	0,132	1,19
0,3	0,0287	0,0499	0,0361	0,322	0,0751	0,677
0,4	0,0292	0,0508	0,0312	0,279	0,0597	0,538
0,412	0,0293	0,0510	0,0310	0,277	0,0414	0,373
0,5	0,0295	0,0513	0,0296	0,264	0,0396	0,357
0,6	0,0290	0,0505	0,0284	0,254	0,0346	0,312
0,662	0,0287	0,0499	0,0279	0,249	0,0314	0,283
0,8	0,0282	0,0491	0,0269	0,240	0,0299	0,269
1,0	0,0275	0,0478	0,0256	0,229	0,0278	0,250
1,25	0,0261	0,0454	0,0243	0,217	0,0256	0,231
1,5	0,0250	0,0435	0,0233	0,208	0,0241	0,217
2,0	0,0233	0,0405	0,0217	0,194	0,0228	0,205
2,75	0,0211	0,0367	0,0204	0,182	0,0213	0,192
3,0	0,0206	0,0358	0,0203	0,181	0,0205	0,185
4,0	0,0191	0,0332	0,0199	0,178	0,0204	0,184
5,0	0,0182	0,0317	0,0201	0,179	0,0208	0,187
6,0	0,0176	0,0306	0,0205	0,183	0,0215	0,194
8,0	0,0171	0,0298	0,0212	0,189	0,0223	0,201
10,0	0,0168	0,0292	0,0220	0,196	0,0238	0,214
					0,0252	0,227
E_0 , МэВ	Натрий [77] $\text{см}^2/\text{г} = 0,02620 \cdot 10^{24} \text{см}^2/\text{атом}; \rho = 0,9712 \text{ г}/\text{см}^3$		Никель [77] $\text{см}^2/\text{г} = 0,01026 \cdot 10^{24} \text{см}^2/\text{атом}; \rho = 8,9 \text{ г}/\text{см}^3$		Олово [77] $\text{см}^2/\text{г} = 0,005074 \times 10^{24} \text{см}^2/\text{атом}; \rho = 7,29 \text{ г}/\text{см}^3$	
	$\mu_{\text{ен. т.}}$, $\text{см}^2/\text{г}$	$\mu_{\text{ен.}}$, см^{-1}	$\mu_{\text{ен. т.}}$, $\text{см}^2/\text{г}$	$\mu_{\text{ен.}}$, см^{-1}	$\mu_{\text{ен. т.}}$, $\text{см}^2/\text{г}$	$\mu_{\text{ен.}}$, см^{-1}
0,01	14,6	14,2	155	1380	131	955
0,015	4,19	4,07	58,2	518	43,4	316
0,02	1,72	1,67	27,4	244	19,6	143
0,0292 (К Sn)	—	—	—	—	6,90	50,3
0,03	0,485	0,471	8,98	79,9	15,6	114
0,04	0,198	0,192	3,96	35,2	10,0	72,9
0,05	0,104	0,101	2,07	18,4	6,39	46,6
0,06	0,0644	0,0625	1,21	10,8	4,27	31,1
0,08	0,0369	0,0358	0,526	4,68	2,13	15,5
0,1	0,0283	0,0275	0,277	2,46	1,20	8,75
0,145	0,0256	0,0249	0,105	0,934	0,440	3,21

Продолжение табл. 5.3

E_0 , МэВ	Натрий [77] $\text{см}^2/\text{г} = 0,02620 \cdot 10^{24} \text{см}^2/\text{атом}; \rho = 0,9712 \text{ г}/\text{см}^3$		Никель [77] $\text{см}^2/\text{г} = 0,01026 \cdot 10^{24} \text{см}^2/\text{атом}; \rho = 8,9 \text{ г}/\text{см}^3$		Олово [77] $\text{см}^2/\text{г} = 0,005074 \cdot 10^{24} \text{см}^2/\text{атом}; \rho = 7,29 \text{ г}/\text{см}^3$	
	$\mu_{\text{ен. т.}}$, $\text{см}^2/\text{г}$	$\mu_{\text{ен.}}$, см^{-1}	$\mu_{\text{ен. т.}}$, $\text{см}^2/\text{г}$	$\mu_{\text{ен.}}$, см^{-1}	$\mu_{\text{ен. т.}}$, $\text{см}^2/\text{г}$	$\mu_{\text{ен.}}$, см^{-1}
0,15	0,0255	0,0248	0,0975	0,868	0,418	3,05
0,2	0,0261	0,0253	0,0562	0,500	0,201	1,46
0,279	0,0272	0,0264	0,0390	0,347	0,0981	0,715
0,3	0,0275	0,0267	0,0365	0,325	0,0832	0,606
0,4	0,0283	0,0275	0,0321	0,286	0,0518	0,378
0,412	0,0284	0,0276	0,0319	0,284	0,0487	0,355
0,5	0,0286	0,0278	0,0306	0,272	0,0403	0,294
0,6	0,0283	0,0275	0,0294	0,262	0,0347	0,253
0,662	0,0282	0,0274	0,0289	0,257	0,0326	0,238
0,8	0,0275	0,0268	0,0280	0,249	0,0291	0,212
1,0	0,0265	0,0257	0,0268	0,238	0,0260	0,190
1,25	0,0257	0,0250	0,0255	0,227	0,0242	0,176
1,5	0,0244	0,0237	0,0243	0,216	0,0226	0,165
2,0	0,0225	0,0218	0,0226	0,201	0,0210	0,153
2,75	0,0205	0,0199	0,0212	0,189	0,0204	0,149
3,0	0,0200	0,0194	0,0210	0,187	0,0204	0,149
4,0	0,0185	0,0180	0,0207	0,184	0,0212	0,154
5,0	0,0175	0,0170	0,0208	0,185	0,0221	0,161
6,0	0,0168	0,0163	0,0211	0,188	0,0231	0,168
8,0	0,0162	0,0157	0,0220	0,196	0,0249	0,182
10,0	0,0158	0,0153	0,0226	0,201	0,0264	0,192
E_0 , МэВ	Платина [77] $\text{см}^2/\text{г} = 0,003087 \times 10^{24} \text{см}^2/\text{атом}; \rho = 21,4 \text{ г}/\text{см}^3$		Свинец [77] $\text{см}^2/\text{г} = 0,002907 \times 10^{24} \text{см}^2/\text{атом}; \rho = 11,34 \text{ г}/\text{см}^3$		Сера [77] $\text{см}^2/\text{г} = 0,01878 \times 10^{24} \text{см}^2/\text{атом}; \rho = 1,96 \text{ г}/\text{см}^3$	
	$\mu_{\text{ен. т.}}$, $\text{см}^2/\text{г}$	$\mu_{\text{ен.}}$, см^{-1}	$\mu_{\text{ен. т.}}$, $\text{см}^2/\text{г}$	$\mu_{\text{ен.}}$, см^{-1}	$\mu_{\text{ен. т.}}$, $\text{см}^2/\text{г}$	$\mu_{\text{ен.}}$, см^{-1}
0,01	106	2270	123	1390	48,1	94,3
0,011564 (L_3 Pt)	73,2	1570	—	—	—	—
0,013035 (L_3 Pb)	157	3360	—	—	—	—
0,013273 (L_2 Pt)	—	—	62,2	705	—	—
0,01388 (L_1 Pt)	110	2350	127	1440	—	—
0,015	146	3120	—	—	—	—
0,0152	132	2820	—	—	—	—
0,015861 (L_1 Pb)	150	3210	—	—	—	—
0,02	125	2680	—	—	—	—
0,03	—	—	88,4	1000	14,5	28,4
0,04	—	—	86,3	979	—	—
0,05	—	—	114	1290	—	—
0,06	—	—	104	1180	—	—
0,08	—	—	119	1350	—	—
0,1	62,7	1340	68,3	774	6,12	12,0
0,145	22,4	479	25,1	285	1,78	3,49
0,2	10,6	227	12,0	136	0,736	1,44
0,3	5,83	125	6,66	75,5	0,374	0,733
0,4	3,55	76,0	4,10	46,5	0,220	0,431
0,5	—	—	—	—	—	—
0,6	1,74	37,2	—	—	—	—
0,8	2,99	64,0	—	—	—	—
1,0	2,98	63,8	1,90	21,5	0,0990	0,194

Продолжение табл. 5.3

E ₀ , МэВ	Платина [77] см ² /г = = 0,003087 × × 10 ²⁴ см ² /атом; ρ = 21,4 г/см ³		Свинец [77] см ² /г = = 0,002907 × × 10 ²⁴ см ² /атом; ρ = 11,34 г/см ³		Сера [77] см ² /г = = 0,01878 × × 10 ²⁴ см ² /атом; ρ = 1,96 г/см ³	
	μ _{en, m} , см ² /г	μ _{en} , см ⁻¹	μ _{en, m} , см ² /г	μ _{en} , см ⁻¹	μ _{en, m} , см ² /г	μ _{en} , см ⁻¹
0,088004 (K Pb)	—	—	1,48	16,8	—	—
0,1	2,28	48,8	2,23	25,3	0,0595	0,117
0,145	1,15	24,6	1,22	13,8	0,0351	0,0688
0,15	1,07	22,9	1,14	12,9	0,0344	0,0674
0,2	0,571	12,2	0,625	7,09	0,0304	0,0596
0,279	0,281	6,01	0,300	3,40	0,0299	0,0586
0,3	0,232	4,96	0,259	2,94	0,0297	0,0582
0,4	0,129	2,76	0,144	1,63	0,0299	0,0586
0,412	0,120	2,57	0,137	1,55	0,0299	0,0586
0,5	0,0861	1,84	0,0956	1,08	0,0300	0,0588
0,6	0,0648	1,39	0,0715	0,811	0,0297	0,0582
0,662	0,0581	1,24	0,0645	0,731	0,0293	0,0574
0,8	0,0451	0,965	0,0485	0,550	0,0287	0,0562
1,0	0,0355	0,760	0,0378	0,429	0,0278	0,0545
1,25	0,0305	0,653	0,0320	0,363	0,0264	0,0517
1,5	0,0265	0,567	0,0276	0,313	0,0254	0,0498
2,0	0,0238	0,509	0,0244	0,277	0,0235	0,0461
2,75	0,0233	0,499	0,0237	0,269	0,0217	0,0425
3,0	0,0232	0,496	0,0236	0,268	0,0212	0,0416
4,0	0,0244	0,522	0,0248	0,281	0,0201	0,0394
5,0	0,0258	0,552	0,0264	0,299	0,0193	0,0378
6,0	0,0272	0,582	0,0276	0,313	0,0188	0,0368
8,0	0,0295	0,631	0,0299	0,339	0,0188	0,0368
10,0	0,0312	0,668	0,0317	0,359	0,0188	0,0368
E ₀ , МэВ	Титан [77] см ² /г = = 0,01257 · 10 ²⁴ см ² /атом; ρ = 4,5 г/см ³		Углерод (графит) [75] см ² /г = 0,05014 × × 10 ²⁴ см ² /атом; ρ = 2,25 г/см ³		Уран [77] см ² /г = = 0,002530 · 10 ²⁴ см ² /атом ρ = 18,7 г/см ³	
	μ _{en, m} , см ² /г	μ _{en} , см ⁻¹	μ _{en, m} , см ² /г	μ _{en} , см ⁻¹	μ _{en, m} , см ² /г	μ _{en} , см ⁻¹
0,01	99,3	447	2,00	4,50	170	3180
0,015	32,8	148	0,543	1,22	59,7	1120
0,01717 (L ₃ U)	—	—	—	—	42,5	795
0,2	14,6	65,7	0,216	0,486	80,7	1510
0,020948 (L ₂ U)	—	—	—	—	55,7	1040
0,021759 (L ₁ U)	—	—	—	—	49,6	928
0,03	4,42	19,9	0,0641	0,144	65,8	1230
0,04	1,90	8,55	0,0326	0,0734	60,5	1130
0,05	0,962	4,33	0,0236	0,0531	68,0	1270
0,06	0,558	2,51	0,0208	0,0468	32,4	606
0,08	0,240	1,08	0,0203	0,0457	16,1	301
0,1	0,129	0,580	0,0214	0,0482	9,13	171
0,115606 (K U)	—	—	—	—	5,69	106
					2,68	50,1
					1,50	28,0
					1,03	19,3
					1,65	30,8

Продолжение табл. 5.3

E ₀ , МэВ	Титан [77] см ² /г = = 0,01257 · 10 ²⁴ см ² /атом; ρ = 4,5 г/см ³		Углерод (графит) [75] см ² /г = 0,05014 × × 10 ²⁴ см ² /атом; ρ = 2,25 г/см ³		Уран [77] см ² /г = = 0,002530 × × 10 ²⁴ см ² /атом; ρ = 18,7 г/см ³	
	μ _{en, m} , см ² /г	μ _{en} , см ⁻¹	μ _{en, m} , см ² /г	μ _{en} , см ⁻¹	μ _{en, m} , см ² /г	μ _{en} , см ⁻¹
0,145	0,0560	0,252	0,0242	0,0544	1,28	23,9
0,15	0,0529	0,238	0,0245	0,0551	1,22	22,8
0,2	0,0367	0,165	0,0266	0,0598	0,736	13,8
0,279	0,0308	0,139	0,0283	0,0637	0,385	7,20
0,3	0,0300	0,135	0,0287	0,0646	0,324	6,06
0,4	0,0287	0,129	0,0295	0,0664	0,185	3,46
0,412	0,0285	0,128	0,0296	0,0666	0,175	3,27
0,5	0,0280	0,126	0,0297	0,0668	0,122	2,28
0,6	0,0276	0,124	0,0296	0,0666	0,0903	1,69
0,662	0,0273	0,123	0,0294	0,0662	0,0800	1,50
0,8	0,0265	0,119	0,0288	0,0648	0,0592	1,11
1,0	0,0255	0,115	0,0279	0,0628	0,0448	0,838
1,25	0,0244	0,110	0,0267	0,0601	0,0360	0,673
1,5	0,0232	0,104	0,0255	0,0574	0,0306	0,572
2,0	0,0217	0,0976	0,0234	0,0526	0,0263	0,492
2,75	0,0204	0,0918	0,0211	0,0475	0,0252	0,471
3,0	0,0200	0,0900	0,0205	0,0461	0,0250	0,468
4,0	0,0192	0,0864	0,0185	0,0416	0,0260	0,486
5,0	0,0190	0,0855	0,0171	0,0385	0,0276	0,516
6,0	0,0190	0,0855	0,0161	0,0362	0,0288	0,538
8,0	0,0192	0,0864	0,0147	0,0331	0,0309	0,578
10,0	0,0197	0,0886	0,0138	0,0310	0,0321	0,600
E ₀ , МэВ	Фосфор [77] см ² /г = 0,01944 · 10 ²⁴ см ² /атом; ρ = 1,83 г/см ³		Хром [77] см ² /г = 0,01158 · 10 ²⁴ см ² /атом; ρ = 7,14 г/см ³			
	μ _{en, m} , см ² /г	μ _{en} , см ⁻¹	μ _{en, m} , см ² /г	μ _{en} , см ⁻¹		
0,01	38,7	70,8	118	842		
0,015	11,6	21,2	40,8	291		
0,02	4,84	8,86	18,4	131		
0,03	1,40	2,56	5,77	41,2		
0,04	0,575	1,05	2,48	17,7		
0,05	0,294	0,538	1,26	9,00		
0,06	0,172	0,315	0,739	5,28		
0,08	0,0805	0,147	0,315	2,25		
0,1	0,0496	0,0908	0,168	1,20		
0,145	0,0319	0,0584	0,0685	0,489		
0,15	0,0313	0,0573	0,0645	0,460		
0,2	0,0286	0,0523	0,0414	0,296		
0,279	0,0286	0,0523	0,0320	0,228		
0,3	0,0286	0,0523	0,0315	0,225		
0,4	0,0290	0,0531	0,0294	0,210		
0,412	0,0290	0,0531	0,0293	0,209		
0,5	0,0290	0,0531	0,0286	0,204		
0,6	0,0288	0,0527	0,0280	0,200		
0,662	0,0286	0,0523	0,0277	0,198		
0,8	0,0278	0,0509	0,0269	0,192		
1,0	0,0268	0,0490	0,0257	0,183		

E_0 , МэВ	Фосфор [77] $\text{см}^2/\text{г} = 0,01944 \cdot 10^{24} \text{ см}^2/\text{атом};$ $\rho = 1,83 \text{ г}/\text{см}^3$		Хром [77] $\text{см}^2/\text{г} = 0,01158 \cdot 10^{24} \text{ см}^2/\text{атом};$ $\rho = 7,14 \text{ г}/\text{см}^3$	
	$\mu_{\text{ен}, \text{м}}, \text{см}^2/\text{г}$	$\mu_{\text{ен}}, \text{см}^{-1}$	$\mu_{\text{ен}, \text{м}}, \text{см}^2/\text{г}$	$\mu_{\text{ен}}, \text{см}^{-1}$
1,25	0,0257	0,0470	0,0246	0,176
1,5	0,0245	0,0448	0,0235	0,168
2,0	0,0227	0,0415	0,0219	0,156
2,75	0,0208	0,0381	0,0205	0,146
3,0	0,0204	0,0373	0,0201	0,144
4,0	0,0192	0,0351	0,0196	0,140
5,0	0,0185	0,0338	0,0194	0,138
6,0	0,0181	0,0331	0,0194	0,138
8,0	0,0179	0,0328	0,0200	0,143
10,0	0,0178	0,0326	0,0206	0,147

Для наиболее часто используемых элементов, а также для элементов, из которых состоят вода и воздух, парциальные сечения приводятся в табл. 5.4. В табл. 5.5 помещены электронные сечения комптоновского рассеяния на свободном электроны.

Отметим несколько форм описания сечений взаимодействия фотонов.

1. Энергетическая зависимость массовых коэффициентов взаимодействия фотонов с энергией $E_0 = 0,02 \div 2$ МэВ может аппроксимироваться с погрешностью не выше 1,5 % (за исключением нескольких точек, где различие может составлять 2,5–3 %) с использованием интерполяционной формулы вида [82]:

$$\mu_m(E_0) = \exp \left[\sum_{i=0}^n A_i (\ln E_0)^i \right], \quad (5.5)$$

где коэффициенты A_i для μ_m , $\mu_{\text{инcoh}, \text{м}}$, $\mu_{\text{ен}, \text{м}}$ определены в [83] и приведены в табл. 5.6–5.8 для воздуха, воды, бетона, алюминия и железа.

2. Для воды ($\rho = 1 \text{ г}/\text{см}^3$) с погрешностью ± 4 % для $E_0 = 0,5 \div 3$ МэВ и ± 8 % для $E_0 = 0,4 \div 15$ МэВ массовый коэффициент ослабления μ_m , $\text{см}^2/\text{г}$, можно аппроксимировать формулой [84]

$$\mu_m(E_0) = 0,07 / \sqrt{E_0}, \quad (5.6)$$

где E_0 выражена в мегаэлектрон-вольтах.

3. Для воздуха для $E_0 = 0,04 \div 15$ МэВ μ_m меньше, чем μ_m для воды на 6–12 %.

4. Для алюминия ($\rho = 2,7 \text{ г}/\text{см}^3$) с невысокой погрешностью для $E_0 = 0,3 \div 9$ МэВ μ_m , $\text{см}^2/\text{г}$, можно аппроксимировать формулой

$$\mu_m(E_0) = 0,06 / \sqrt{E_0}, \quad (5.7)$$

где E_0 выражена в мегаэлектрон-вольтах.

Приведенные в табл. 5.9–5.11 дифференциальные сечения комптоновского рассеяния Клейна–Нишины–Тамма для числа фотонов $d\sigma_{\text{ч}}(E_0, \theta_s)/d\Omega$ в $10^{-26} \text{ см}^2/(\text{электрон} \cdot \text{ср})$ [$10^{-26} \text{ б}/(\text{электрон} \cdot \text{ср})$] и для энергии фотонов $d\sigma_s(E_0, \theta_s)/d\Omega$ в $10^{-26} \text{ см}^2/(\text{электрон} \cdot \text{ср})$ [$10^{-26} \text{ б}/(\text{электрон} \cdot \text{ср})$], а также энергия E_{s1} в МэВ однократно рассеянных под углом θ_s фотонов с энергией E_0 , МэВ, рассчитаны по формулам:

Парциальные микроскопические сечения когерентного рассеяния σ_{coh} , некогерентного рассеяния на связанном электроны $\sigma_{\text{инcoh}}$, фотоэлектрического поглощения σ_{ph} , образования пар σ_{pp} и полное (с учетом когерентного рассеяния) микроскопическое сечение σ_{tot} , $10^{-24} \text{ см}^2/\text{атом}$ (б/атом)*1

E_0 , МэВ	σ_{coh}	$\sigma_{\text{инcoh}}$	σ_{ph}	σ_{pp}	σ_{tot}
Азот ($\text{см}^2/\text{г} = 0,043 \cdot 10^{24} \text{ см}^2/\text{атом}$)*2 [75]					
0,01	4,722+00	3,093+00	8,008+01	—	8,790+01
0,015	2,803+00	3,449+00	2,181+01	—	2,807+01
0,02	1,867+00	3,645+00	8,586+00	—	1,410+01
0,03	9,811-01	3,800+00	2,276+00	—	7,058+00
0,04	6,015-01	3,811+00	8,810-01	—	5,293+00
0,05	4,043-01	3,766+00	4,208-01	—	4,591+00
0,06	2,903-01	3,700+00	2,297-01	—	4,220+00
0,08	1,699-01	3,551+00	8,836-02	—	3,809+00
0,1	1,111-01	3,403+00	4,216-02	—	3,556+00
0,15	5,057-02	3,084+00	1,109-02	—	3,146+00
0,2	2,870-02	2,834+00	4,378-03	—	2,867+00
0,3	1,284-02	2,469+00	1,231-03	—	2,484+00
0,4	7,239-03	2,215+00	5,263-04	—	2,222+00
0,5	4,639-03	2,023+00	2,833-04	—	2,028+00
0,6	3,224-03	1,872+00	1,763-04	—	1,876+00
0,8	1,814-03	1,645+00	8,897-05	—	1,647+00
1,0	1,162-03	1,479+00	5,530-05	—	1,481+00
1,5	5,163-04	1,202+00	2,609-05	2,191-03	1,205+00
2,0	2,904-04	1,026+00	1,643-05	8,743-03	1,035+00
3,0	1,291-04	8,073-01	9,201-06	2,531-02	8,327-01
4,0	7,261-05	6,734-01	6,323-06	4,177-02	7,152-01
5,0	4,647-05	5,815-01	4,800-06	5,681-02	6,384-01
6,0	3,228-05	5,140-01	3,861-06	7,025-02	5,843-01
8,0	1,815-05	4,205-01	2,770-06	9,329-02	5,138-01
10,0	1,162-05	3,581-01	2,157-06	1,124-01	4,705-01

Алюминий ($\text{см}^2/\text{г} = 0,02232 \cdot 10^{24} \text{ см}^2/\text{атом}$) [77]

0,01	2,47+01	4,76+00	1,15+03	—	1,18+03
0,015	1,41+01	5,67+00	3,29+02	—	3,49+02
0,02	9,18+00	6,15+00	1,37+02	—	1,52+02
0,03	4,92+00	6,57+00	3,82+01	—	4,97+01
0,04	3,08+00	6,70+00	1,54+01	—	2,52+01
0,05	2,10+00	6,71+00	7,58+00	—	1,64+01
0,06	1,52+00	6,65+00	4,24+00	—	1,24+01
0,08	8,98-01	6,45+00	1,68+00	—	9,03+00
0,1	5,91-01	6,22+00	8,08-01	—	7,62+00
0,15	2,74-01	5,68+00	2,15-01	—	6,17+00
0,2	1,57-01	5,23+00	8,81-02	—	5,48+00
0,3	7,01-02	4,57+00	2,54-02	—	4,67+00
0,4	3,96-02	4,10+00	1,08-02	—	4,15+00
0,5	2,55-02	3,75+00	5,85-03	—	3,78+00
0,6	1,77-02	3,47+00	3,65-03	—	3,49+00
0,8	9,99-03	3,05+00	1,89-03	—	3,06+00
1,0	6,42-03	2,74+00	1,17-03	—	2,75+00
1,5	2,88-03	2,23+00	—	7,68-03	2,24+00
2,0	1,63-03	1,90+00	—	3,03-02	1,93+00

Продолжение табл. 5.4

Продолжение табл. 5.4

E_0 , МэВ	σ_{coh}	σ_{incoh}	σ_{ph}	σ_{pp}	σ_{tot}
3,0	—	1,50+00	—	8,70-02	1,59+00
4,0	—	1,25+00	—	1,42-01	1,39+00
5,0	—	1,08+00	—	1,91-01	1,27+00
6,0	—	9,54-01	—	2,35-01	1,19+00
8,0	—	7,81-01	—	3,10-01	1,09+00
10,0	—	6,65-01	—	3,72-01	1,04+00

Аргон ($\text{см}^2/\text{г}=0,01508 \cdot 10^{24} \text{ см}^2/\text{атом}$) [75]

0,01	4,905+01	6,161+00	4,135+03	—	4,190+03
0,015	3,011+01	7,330+00	1,267+03	—	1,305+03
0,02	1,993+01	8,048+00	5,380+02	—	5,660+02
0,03	1,067+01	8,727+00	1,576+02	—	1,770+02
0,04	6,751+00	8,961+00	6,498+01	—	8,069+01
0,05	4,671+00	9,013+00	3,244+01	—	4,612+01
0,06	3,421+00	8,975+00	1,832+01	—	3,071+01
0,08	2,050+00	8,767+00	7,395+00	—	1,821+01
0,1	1,363+00	8,493+00	3,649+00	—	1,350+01
0,15	6,362-01	7,801+00	1,013+00	—	9,449+00
0,2	3,665-01	7,209+00	4,119-01	—	7,987+00
0,3	1,663-01	6,314+00	1,201-01	—	6,600+00
0,4	9,435-02	5,674+00	5,233-02	—	5,820+00
0,5	6,063-02	5,189+00	2,850-02	—	5,278+00
0,6	4,220-02	4,805+00	1,785-02	—	4,865+00
0,8	2,379-02	4,225+00	9,055-03	—	4,258+00
1,0	1,524-02	3,801+00	5,633-03	—	3,822+00
1,5	6,782-03	3,090+00	2,639-03	1,509-02	3,115+00
2,0	3,816-03	2,638+00	1,639-03	5,905-02	2,702+00
3,0	1,697-03	2,075+00	8,992-04	1,677-01	2,246+00
4,0	9,543-04	1,731+00	6,101-04	2,721-01	2,005+00
5,0	6,102-04	1,495+00	4,591-04	3,655-01	1,862+00
6,0	4,242-04	1,322+00	3,669-04	4,482-01	1,771+00
8,0	2,386-04	1,081+00	2,610-04	5,881-01	1,670+00
10,0	1,527-04	9,208-01	2,022-04	7,026-01	1,624+00

Водород ($\text{см}^2/\text{г}=0,5975 \cdot 10^{24} \text{ см}^2/\text{атом}$) [75]

0,01	4,121-02	5,993-01	4,567-03	—	6,451-01
0,015	1,943-02	6,095-01	1,131-03	—	6,301-01
0,02	1,119-02	6,068-01	4,194-04	—	6,184-01
0,03	5,062-03	5,924-01	1,035-04	—	5,976-01
0,04	2,866-03	5,759-01	3,840-05	—	5,788-01
0,05	1,840-03	5,597-01	1,781-05	—	5,615-01
0,06	1,280-03	5,444-01	9,515-06	—	5,457-01
0,08	7,211-04	5,166-01	3,550-06	—	5,173-01
0,1	4,619-04	4,923-01	1,660-06	—	4,928-01
0,15	2,054-04	4,435-01	4,233-07	—	4,437-01
0,2	1,156-04	4,064-01	1,638-07	—	4,066-01
0,3	5,138-05	3,535-01	4,515-08	—	3,536-01
0,4	2,890-05	3,168-01	1,910-08	—	3,168-01
0,5	1,850-05	2,893-01	1,023-08	—	2,893-01
0,6	1,285-05	2,676-01	6,348-09	—	2,677-01
0,8	7,227-06	2,351-01	3,199-09	—	2,351-01
1,0	4,625-06	2,114-01	1,991-09	—	2,114-01

E_0 , МэВ	σ_{coh}	σ_{incoh}	σ_{ph}	σ_{pp}	σ_{tot}
1,5	2,056-06	1,718-01	9,453-10	4,428-05	1,719-01
2,0	1,156-06	1,466-01	5,992-10	1,777-04	1,468-01
3,0	5,139-07	1,153-01	3,385-10	5,510-04	1,159-01
4,0	2,891-07	9,620-02	2,338-10	9,945-04	9,720-02
5,0	1,850-07	8,308-02	1,780-10	1,442-03	8,452-02
6,0	1,285-07	7,343-02	1,435-10	1,869-03	7,530-02
8,0	7,227-08	6,007-02	1,032-10	2,638-03	6,271-02
10,0	4,625-08	5,116-02	8,044-11	3,305-03	5,446-02

Железо ($\text{см}^2/\text{г}=0,01078 \cdot 10^{24} \text{ см}^2/\text{атом}$) [77]

0,01	1,12+02	7,96+00	1,57+04	—	1,58+04
0,015	6,92+01	9,76+00	5,19+03	—	5,27+03
0,02	4,80+01	1,08+01	2,31+03	—	2,37+03
0,03	2,65+01	1,20+01	7,11+02	—	7,50+02
0,04	1,67+01	1,24+01	3,04+02	—	3,33+02
0,05	1,15+01	1,26+01	1,55+02	—	1,79+02
0,06	8,51+00	1,26+01	8,98+01	—	1,11+02
0,08	5,13+00	1,24+01	3,74+01	—	5,49+01
0,1	3,37+00	1,20+01	1,87+01	—	3,41+01
0,15	1,57+00	1,11+01	5,36+00	—	1,80+01
0,2	9,07-01	1,03+01	2,23+00	—	1,34+01
0,3	4,07-01	9,08+00	6,65-01	—	1,02+01
0,4	2,30-01	8,17+00	2,94-01	—	8,69+00
0,5	1,48-01	7,47+00	1,61-01	—	7,78+00
0,6	1,03-01	6,92+00	1,02-01	—	7,12+00
0,8	5,80-02	6,09+00	5,20-02	—	6,20+00
1,0	3,73-02	5,48+00	3,22-02	—	5,55+00
1,5	1,66-02	4,46+00	1,49-02	3,32-02	4,52+00
2,0	9,43-03	3,80+00	9,15-03	1,26-01	3,94+00
3,0	4,30-03	2,99+00	5,09-03	3,51-01	3,35+00
4,0	2,50-03	2,50+00	3,46-03	5,65-01	3,07+00
5,0	1,63-03	2,16+00	2,63-03	7,54-01	2,92+00
6,0	1,12-03	1,91+00	2,08-03	9,21-01	2,83+00
8,0	—	1,56+00	1,47-03	1,20+00	2,76+00
10,0	—	1,33+00	1,14-03	1,43+00	2,76+00

Кислород ($\text{см}^2/\text{г}=0,03764 \cdot 10^{24} \text{ см}^2/\text{атом}$) [75]

0,01	6,805+00	3,439+00	1,447+02	—	1,550+02
0,015	3,942+00	3,864+00	3,995+01	—	4,775+01
0,02	2,623+00	4,092+00	1,585+01	—	2,256+01
0,03	1,389+00	4,286+00	4,247+00	—	9,922+00
0,04	8,552-01	4,315+00	1,655+00	—	6,825+00
0,05	5,761-01	4,275+00	7,940-01	—	5,645+00
0,06	4,145-01	4,207+00	4,350-01	—	5,056+00
0,08	2,433-01	4,044+00	1,681-01	—	4,455+00
0,1	1,595-01	3,880+00	8,049-02	—	4,120+00
0,15	7,289-02	3,521+00	2,129-02	—	3,615+00
0,2	4,143-02	3,236+00	8,413-03	—	3,286+00
0,3	1,856-02	2,821+00	2,379-03	—	2,842+00
0,4	1,047-02	2,530+00	1,018-03	—	2,546+00
0,5	6,710-03	2,312+00	5,488-04	—	2,319+00
0,6	4,664-03	2,139+00	3,418-04	—	2,144+00

Продолжение табл. 5.4

E_0 , МэВ	σ_{coh}	$\sigma_{in coh}$	σ_{ph}	σ_{pp}	σ_{tot}
0,8	2,626-03	1,880+00	1,725-04	—	1,883+00
1,0	1,681-03	1,691+00	1,073-04	—	1,692+00
1,5	7,471-04	1,374+00	5,054-05	2,871-03	1,378+00
2,0	4,203-04	1,173+00	3,179-05	1,144-02	1,185+00
3,0	1,868-04	9,226-01	1,776-05	3,304-02	9,558-01
4,0	1,051-04	7,696-01	1,219-05	5,439-02	8,241-01
5,0	6,725-05	6,246-01	9,242-06	7,381-02	7,385-01
6,0	4,672-05	5,874-01	7,430-06	9,115-02	6,786-01
8,0	2,627-05	4,805-01	5,327-06	1,208-01	6,014-01
10,0	1,682-05	4,093-01	4,147-06	1,454-01	5,546-01

Свинец ($\text{см}^2/\text{г}=0,002907 \cdot 10^{24} \text{ см}^2/\text{атом}$) [77]

0,01	1,71+03	1,57+01	4,22+04	—	4,39+04
0,013035 (L_3 Pb)	1,33+03	1,89+01	2,14+04	—	2,27+04
0,015	1,14+03	2,05+01	5,47+04	—	5,60+04
0,0152 (L_2 Pb)	1,12+03	2,07+01	3,68+04	—	3,80+04
0,015861 (L_1 Pb)	1,07+03	2,12+01	3,59+04	—	3,70+04
0,02	8,05+02	2,39+01	5,01+04	—	5,12+04
0,03	4,74+02	2,85+01	4,51+04	—	4,62+04
0,04	3,14+02	3,13+01	5,22+04	—	5,33+04
0,05	2,21+02	3,29+01	2,85+04	—	2,93+04
0,06	1,65+02	3,38+01	9,79+03	—	1,03+04
0,08	1,01+02	3,44+01	4,53+03	—	4,88+03
0,088004 (K Pb)	8,45+01	3,44+01	2,46+03	—	2,71+03
0,1	6,70+01	3,43+01	1,50+03	—	1,70+03
0,15	3,16+01	3,32+01	6,80+02	—	8,15+02
0,2	1,83+01	3,14+01	5,26+02	—	6,45+02
0,3	8,27+00	2,80+01	2,48+03	—	2,60+03
0,4	4,69+00	2,54+01	1,80+03	—	1,90+03
0,5	3,02+00	2,33+01	6,27+02	—	6,92+02
0,6	2,10+00	2,17+01	2,92+02	—	3,42+02
0,8	1,18+00	1,91+01	1,01+02	—	1,37+02
1,0	7,60-01	1,72+01	4,87+01	—	7,88+01
1,5	3,37-01	1,40+01	2,84+01	—	5,47+01
2,0	1,91-01	1,20+01	1,86+01	—	4,24+01
3,0	8,57-02	9,42+00	9,86+00	—	3,01+01
4,0	4,95-02	7,89+00	6,21+00	5,66-01	2,42+01
5,0	3,22-02	6,81+00	2,85+00	1,70+00	1,78+01
6,0	2,23-02	6,02+00	1,71+00	3,94+00	1,56+01
8,0	1,26-02	4,92+00	8,88-01	5,78+00	1,43+01
10,0	8,14-03	4,19+00	5,88-01	7,33+00	1,43+01
			4,35-01	8,58+00	1,46+01
			1,06+01	1,06+01	1,58+01
			1,79-01	1,23+01	1,67+01

Углерод ($\text{см}^2/\text{г}=0,05014 \cdot 10^{24} \text{ см}^2/\text{атом}$) [75]

0,01	3,248+00	2,697+00	3,990+01	—	4,584+01
0,015	1,958+00	3,012+00	1,073+01	—	1,670+01
0,02	1,295+00	3,182+00	4,183+00	—	8,659+00
0,03	6,720-01	3,300+00	1,097+00	—	5,069+00
0,04	4,082-01	3,296+00	4,215-01	—	4,126+00

Продолжение табл. 5.4

E_0 , МэВ	σ_{coh}	$\sigma_{in coh}$	σ_{ph}	σ_{pp}	σ_{tot}
0,05	2,736-01	3,250+00	2,003-01	—	3,724+00
0,06	1,957-01	3,188+00	1,089-01	—	3,493+00
0,08	1,139-01	3,054+00	4,170-02	—	3,209+00
0,1	7,418-02	2,924+00	1,982-02	—	3,018+00
0,15	3,360-02	2,647+00	5,200-03	—	2,686+00
0,2	1,903-02	2,431+00	2,044-03	—	2,452+00
0,3	8,502-03	2,118+00	5,727-04	—	2,127+00
0,4	4,791-03	1,899+00	2,443-04	—	1,904+00
0,5	3,069-03	1,734+00	1,314-04	—	1,738+00
0,6	2,132-03	1,605+00	8,173-05	—	1,607+00
0,8	1,200-03	1,410+00	4,121-05	—	1,412+00
1,0	7,681-04	1,268+00	2,562-05	—	1,269+00
1,5	3,414-04	1,031+00	1,210-05	1,606-03	1,033+00
2,0	1,921-04	8,795-01	7,632-06	6,415-03	8,861-01
3,0	8,537-05	6,920-01	4,281-06	1,863-02	7,107-01
4,0	4,802-05	5,772-01	2,947-06	3,084-02	6,081-01
5,0	3,073-05	4,985-01	2,239-06	4,203-02	5,405-01
6,0	2,134-05	4,406-01	1,802-06	5,207-02	4,927-01
8,0	1,201-05	3,604-01	1,294-06	6,933-02	4,297-01
10,0	7,683-06	3,069-01	1,009-06	8,366-02	3,906-01

Уран ($\text{см}^2/\text{г}=0,002530 \cdot 10^{24} \text{ см}^2/\text{атом}$) [77]

0,01	2,17+03	1,75+01	6,71+04	—	6,93+04
0,015	1,48+03	2,27+01	2,36+04	—	2,51+04
0,01717 (L_3 U)	1,27+03	2,44+01	1,68+04	—	1,81+04
0,2	1,06+03	2,64+01	4,05+04	—	4,18+04
0,020948 (L_2 U)	1,00+03	2,69+01	2,69+04	—	2,80+04
0,021759 (L_1 U)	9,57+02	2,74+01	2,37+04	—	2,47+04
0,03	6,26+02	3,12+01	3,36+04	—	3,46+04
0,04	4,18+02	3,42+01	3,05+04	—	3,15+04
0,05	2,97+02	3,61+01	3,51+04	—	3,61+04
0,06	2,22+02	3,71+01	1,54+04	—	1,61+04
0,08	1,36+02	3,79+01	7,27+03	—	7,72+03
0,1	9,02+01	3,79+01	4,02+03	—	4,35+03
0,115606 (K U)	6,93+01	3,80+01	2,46+03	—	2,72+03
0,15	4,27+01	3,70+01	1,13+03	—	1,30+03
0,2	2,48+01	3,50+01	6,20+02	—	7,48+02
0,3	1,12+01	3,13+01	4,19+02	—	5,26+02
0,4	6,34+00	2,84+01	1,80+03	—	1,91+03
0,5	4,08+00	2,61+01	9,41+02	—	1,02+03
0,6	2,83+00	2,43+01	4,49+02	—	5,09+02
0,8	1,60+00	2,14+01	1,60+02	—	2,02+02
1,0	1,03+00	1,93+01	7,89+01	—	1,14+02
1,5	4,56-01	1,57+01	4,66+01	—	7,68+01
2,0	2,58-01	1,34+01	3,08+01	—	5,79+01
3,0	1,16-01	1,06+01	1,65+01	—	3,95+01
4,0	6,65-02	8,85+00	1,05+01	—	3,08+01
5,0	4,31-02	7,64+00	4,79+00	7,77-01	2,17+01
6,0	3,01-02	6,75+00	2,88+00	2,26+00	1,88+01
			1,48+00	5,09+00	1,73+01
			9,68-01	7,34+00	1,72+01
			7,16-01	9,19+00	1,76+01
			1,06+01	1,06+01	1,79+01

Продолжение табл. 5.4

E_0 , МэВ	σ_{coh}	σ_{incoh}	σ_{ph}	σ_{pp}	σ_{tot}
8,0	1,70-02	5,53+00	3,83-01	1,38+01	1,90+01
10,0	1,09-02	4,71+00	2,95-01	1,50+01	2,00+01

*1 В таблице числа $a \pm b$ читать как $a \cdot 10^{\pm b}$.

*2 Здесь и для других материалов в этой таблице коэффициент связи микроскопического коэффициента взаимодействия, выраженного во внесистемных единицах б/атом, с макроскопическим массовым, $см^2/г$, имеет приводимое в этой строке значение, умноженное на 10^{-24} , например для азота $см^2/г = 0,043$ б/атом.

Таблица 5.5

Электронное сечение комптоновского рассеяния на свободном электроне $\sigma_{ск}$, 10^{-24} $см^2/электрон$ [б/электрон], и средняя доля энергии фотона f , преобразуемая в кинетическую энергию электрона в акте комптоновского рассеяния на свободном электроне [79]

E_0 , МэВ	$\sigma_{ск}$	f	E_0 , МэВ	$\sigma_{ск}$	f
0,01	0,640	0,0188	0,5	0,289	0,341
0,015	0,629	0,0276	0,6	0,268	0,368
0,02	0,618	0,0360	0,8	0,235	0,409
0,03	0,597	0,0520	1,0	0,211	0,440
0,04	0,579	0,0669	1,5	0,172	0,495
0,05	0,562	0,0807	2	0,147	0,531
0,06	0,546	0,0936	3	0,115	0,577
0,08	0,517	0,117	4	0,0962	0,607
0,10	0,493	0,138	5	0,0831	0,628
0,15	0,444	0,182	6	0,0734	0,644
0,2	0,406	0,216	8	0,0601	0,667
0,3	0,354	0,270	10	0,0512	0,684
0,4	0,317	0,310			

Таблица 5.6

Коэффициенты A_i для расчета массовых коэффициентов ослабления (без учета когерентного рассеяния) μ_m , $см^2/г$, $E_0 = 0,02 \div 2$ МэВ по формуле

$$\mu_m = \exp \left[\sum_{i=0}^n A_i (\ln E_0)^i \right], E_0 \text{ выражена в мегаэлектрон-вольтах}$$

A_i	Воздух	Вода	Бетон	Алюминий	Железо
A_0	-2,756	-2,646	-2,761	-2,798	-2,818
A_1	-4,801 · 10 ⁻¹	-4,486 · 10 ⁻¹	-4,679 · 10 ⁻¹	-4,636 · 10 ⁻¹	-5,621 · 10 ⁻¹
A_2	-5,682 · 10 ⁻²	-5,095 · 10 ⁻²	-1,317 · 10 ⁻³	-1,413 · 10 ⁻³	-6,532 · 10 ⁻²
A_3	-1,538 · 10 ⁻²	-7,720 · 10 ⁻²	-2,841 · 10 ⁻²	-3,290 · 10 ⁻²	1,781 · 10 ⁻¹
A_4	7,271 · 10 ⁻³	-4,173 · 10 ⁻²	-5,174 · 10 ⁻²	-5,439 · 10 ⁻²	1,349 · 10 ⁻¹
A_5	1,400 · 10 ⁻²	3,728 · 10 ⁻³	-7,096 · 10 ⁻³	-6,747 · 10 ⁻³	-5,061 · 10 ⁻³
A_6	4,455 · 10 ⁻³	4,987 · 10 ⁻³	6,236 · 10 ⁻³	6,569 · 10 ⁻³	-1,059 · 10 ⁻²
A_7	3,140 · 10 ⁻¹	5,710 · 10 ⁻¹	1,159 · 10 ⁻³	1,197 · 10 ⁻³	-1,228 · 10 ⁻³

Таблица 5.7

Коэффициенты A_i для расчета массовых коэффициентов некогерентного рассеяния на связанных электронах $\mu_{incoh, m}$, $см^2/г$, для $E_0 = 0,02 \div 2$ МэВ по формуле

$$\mu_{incoh, m}(E_0) = \exp \left[\sum_{i=0}^n A_i (\ln E_0)^i \right], E_0 \text{ выражена в мегаэлектрон-вольтах}$$

A_i	Воздух	Вода	Бетон	Алюминий	Железо
A_0	-2,757	-2,649	-2,761	-2,797	-2,831
A_1	-4,888 · 10 ⁻¹	-4,872 · 10 ⁻¹	-5,075 · 10 ⁻¹	-4,956 · 10 ⁻¹	-4,935 · 10 ⁻¹
A_2	-5,430 · 10 ⁻²	-5,644 · 10 ⁻²	-4,408 · 10 ⁻²	-4,873 · 10 ⁻²	-5,237 · 10 ⁻²
A_3	-2,435 · 10 ⁻³	-6,827 · 10 ⁻³	3,472 · 10 ⁻²	1,648 · 10 ⁻²	1,373 · 10 ⁻²
A_4	6,876 · 10 ⁻⁶	-1,292 · 10 ⁻³	2,084 · 10 ⁻²	1,213 · 10 ⁻²	8,720 · 10 ⁻³
A_5	8,247 · 10 ⁻⁴	1,329 · 10 ⁻³	3,259 · 10 ⁻³	3,932 · 10 ⁻³	3,577 · 10 ⁻³
A_6	1,371 · 10 ⁻⁴	4,208 · 10 ⁻⁴	-1,104 · 10 ⁻⁴	3,304 · 10 ⁻⁴	7,043 · 10 ⁻⁴
A_7	4,806 · 10 ⁻⁶	3,690 · 10 ⁻⁵	-7,299 · 10 ⁻⁵	-1,284 · 10 ⁻⁵	6,545 · 10 ⁻⁵

Таблица 5.8

Коэффициенты A_i для расчета массовых коэффициентов поглощения энергии $\mu_{en, m}$, $см^2/г$, для $E_0 = 0,02 \div 2$ МэВ по формуле

$$\mu_{en, m}(E_0) = \exp \left[\sum_{i=0}^n A_i (\ln E_0)^i \right], E_0 \text{ выражена в мегаэлектрон-вольтах}$$

A_i	Воздух	Вода	Бетон	Алюминий	Железо
-------	--------	------	-------	----------	--------

$E_0 = 0,02 \div 0,04$ МэВ

A_0	-1,643	-8,944 · 10 ⁻¹	-5,767	-1,162 · 10	-3,140
A_1	4,076	4,588	5,275 · 10 ⁻¹	-3,250	2,054 · 10 ⁻¹
A_2	1,215	1,326	6,971 · 10 ⁻¹	1,272 · 10 ⁻¹	3,240 · 10 ⁻¹
A_3	-3,830 · 10 ⁻²	-3,110 · 10 ⁻²	-8,763 · 10 ⁻³	5,917 · 10 ⁻²	-7,949 · 10 ⁻²
A_4	-1,685 · 10 ⁻²	-1,685 · 10 ⁻²	-9,401 · 10 ⁻³	8,532 · 10 ⁻³	-3,167 · 10 ⁻³
A_5	-	-	-	4,202 · 10 ⁻⁴	2,084 · 10 ⁻³

$E_0 = 0,04 \div 2$ МэВ

A_0	-3,581	-3,474	-3,591	-3,632	-3,651
A_1	-1,518 · 10 ⁻¹	-1,536 · 10 ⁻¹	-2,058 · 10 ⁻¹	-2,156 · 10 ⁻¹	-2,659 · 10 ⁻¹
A_2	-1,031 · 10 ⁻¹	-1,046 · 10 ⁻¹	-3,177 · 10 ⁻²	-2,790 · 10 ⁻²	-6,038 · 10 ⁻²
A_3	-5,257 · 10 ⁻²	-4,670 · 10 ⁻²	9,777 · 10 ⁻²	1,044 · 10 ⁻¹	2,026 · 10 ⁻¹
A_4	-3,832 · 10 ⁻²	-3,524 · 10 ⁻²	-5,315 · 10 ⁻²	-6,419 · 10 ⁻²	9,764 · 10 ⁻²
A_5	1,816 · 10 ⁻²	1,408 · 10 ⁻²	-5,913 · 10 ⁻²	-6,631 · 10 ⁻²	-1,091 · 10 ⁻¹
A_6	1,546 · 10 ⁻²	1,227 · 10 ⁻²	-3,761 · 10 ⁻³	-4,826 · 10 ⁻³	-3,014 · 10 ⁻²
A_7	1,984 · 10 ⁻³	1,446 · 10 ⁻³	1,390 · 10 ⁻³	1,392 · 10 ⁻³	8,067 · 10 ⁻³
A_8	-	-	-	-	2,217 · 10 ⁻³

$$\frac{d\sigma_v(E_0, \theta_S)}{d\Omega} = \frac{r_0^2}{2} [1 + \alpha_0(1 - \cos\theta_S)]^{-2} \left[1 + \cos^2\theta_S + \frac{\alpha_0^2(1 - \cos\theta_S)^2}{1 + \alpha_0(1 - \cos\theta_S)} \right]; \quad (5.8)$$

$$\frac{d\sigma_s(E_0, \theta_S)}{d\Omega} = \frac{d\sigma_v(E_0, \theta_S)}{d\Omega} \frac{E_{S1}}{E_0}; \quad (5.9)$$

$$E_{S1} = \frac{E_0}{1 + \frac{E_0}{m_0 c^2} (1 - \cos\theta_S)}; \quad (5.10)$$

Дифференциальное сечение комптоновского рассеяния для числа фотонов
 $d\sigma_c(E_0, \theta) / d\Omega \cdot 10^{-26} \text{ см}^2 / (\text{электрон} \cdot \text{ср}) [10^{-2} \text{ б} / (\text{электрон} \cdot \text{ср})]$

Угол рас- сеяния θ , град	Энергия фотонов источника E_0 , МэВ									
	0,03	0,04	0,05	0,06	0,08	0,1	0,141	0,15	0,2	0,279
0	7,940	7,940	7,940	7,940	7,940	7,940	7,940	7,940	7,940	7,940
2	7,934	7,934	7,934	7,934	7,934	7,933	7,932	7,932	7,931	7,930
5	7,906	7,905	7,904	7,903	7,900	7,898	7,893	7,892	7,886	7,877
7	7,874	7,871	7,869	7,867	7,862	7,857	7,848	7,846	7,834	7,816
10	7,806	7,802	7,797	7,792	7,783	7,774	7,755	7,751	7,728	7,692
15	7,643	7,633	7,623	7,613	7,592	7,572	7,532	7,523	7,474	7,397
20	7,423	7,406	7,388	7,371	7,337	7,303	7,234	7,219	7,137	7,010
25	7,152	7,126	7,100	7,075	7,024	6,974	6,873	6,852	6,733	6,553
30	6,839	6,804	6,769	6,735	6,666	6,599	6,465	6,437	6,281	6,049
35	6,496	6,451	6,407	6,363	6,277	6,193	6,027	5,992	5,802	5,525
40	6,130	6,076	6,022	5,970	5,867	5,767	5,572	5,531	5,312	4,998
45	5,756	5,693	5,631	5,570	5,451	5,338	5,118	5,072	4,831	4,491
50	5,384	5,312	5,242	5,174	5,042	4,917	4,678	4,628	4,371	4,017
55	5,024	4,945	4,868	4,794	4,651	4,516	4,263	4,211	3,944	3,586
60	4,686	4,601	4,518	4,439	4,287	4,146	3,883	3,830	3,560	3,206
65	4,381	4,290	4,203	4,119	3,960	3,814	3,546	3,492	3,223	2,878
70	4,116	4,020	3,928	3,840	3,676	3,526	3,256	3,202	2,936	2,604
75	3,896	3,795	3,699	3,608	3,439	3,286	3,014	2,961	2,701	2,381
80	3,728	3,622	3,521	3,426	3,252	3,096	2,770	2,722	2,514	2,206
85	3,613	3,501	3,396	3,297	3,117	2,957	2,681	2,628	2,374	2,075
90	3,553	3,434	3,322	3,219	3,031	2,866	2,584	2,531	2,276	1,981
100	3,595	3,456	3,328	3,210	2,999	2,817	2,513	2,456	2,190	1,888
120	4,216	4,014	3,830	3,663	3,371	3,124	2,722	2,650	2,312	1,942
140	5,203	4,914	4,653	4,418	4,012	3,674	3,134	3,037	2,594	2,120
160	6,062	5,694	5,366	5,070	4,564	4,146	3,486	3,368	2,836	2,273
180	6,398	5,999	5,642	5,323	4,777	4,327	3,620	3,491	2,927	2,331

Угол рас- сеяния θ , град	Энергия фотонов источника E_0 , МэВ									
	0,3	0,4	0,412	0,5	0,511	0,6	0,661	0,8	1,0	1,25
0	7,940	7,940	7,940	7,940	7,940	7,940	7,940	7,940	7,940	7,940
2	7,930	7,928	7,927	7,926	7,926	7,924	7,923	7,920	7,916	7,912
5	7,874	7,863	7,862	7,851	7,850	7,840	7,833	7,816	7,794	7,765
7	7,812	7,789	7,786	7,766	7,764	7,744	7,730	7,699	7,655	7,600
10	7,683	7,638	7,632	7,593	7,588	7,549	7,523	7,463	7,378	7,274
15	7,377	7,282	7,271	7,190	7,180	7,100	7,046	6,925	6,758	6,559
20	6,978	6,824	6,806	6,677	6,662	6,536	6,452	6,268	6,020	5,734
25	6,506	6,294	6,269	6,093	6,072	5,904	5,793	5,557	5,244	4,898
30	5,990	5,723	5,692	5,477	5,451	5,250	5,120	4,845	4,496	4,123
35	5,455	5,144	5,110	4,866	4,837	4,614	4,473	4,180	3,820	3,448
40	4,920	4,580	4,542	4,283	4,252	4,021	3,876	3,583	3,232	2,882
45	4,408	4,053	4,014	3,750	3,720	3,490	3,349	3,068	2,741	2,424
50	3,932	3,574	3,536	3,278	3,248	3,029	2,896	2,635	2,339	2,059
55	3,502	3,152	3,115	2,870	2,842	2,637	2,515	2,279	2,016	1,770
60	3,124	2,789	2,754	2,525	2,500	2,312	2,202	1,991	1,758	1,545
65	2,800	2,484	2,452	2,241	2,218	2,048	1,949	1,761	1,556	1,368
70	2,530	2,235	2,205	2,011	1,990	1,837	1,747	1,579	1,397	1,230
75	2,311	2,035	2,007	1,830	1,810	1,670	1,590	1,438	1,273	1,122
80	2,139	1,880	1,854	1,689	1,671	1,542	1,468	1,328	1,176	1,036
85	2,010	1,763	1,738	1,583	1,566	1,445	1,375	1,244	1,101	0,9685
90	1,918	1,678	1,655	1,505	1,489	1,372	1,305	1,179	1,042	0,9147
100	1,825	1,585	1,562	1,414	1,398	1,284	1,218	1,095	0,9607	0,8371
120	1,866	1,582	1,555	1,384	1,366	1,236	1,162	1,026	0,8816	0,7526
140	2,024	1,671	1,637	1,430	1,408	1,255	1,169	1,013	0,8532	0,7146
160	2,160	1,752	1,713	1,478	1,453	1,281	1,186	1,015	0,8436	0,6979
180	2,212	1,782	1,742	1,496	1,470	1,291	1,193	1,017	0,8411	0,6931

Угол рассеяния θ , град	Энергия фотонов источника E_0 , МэВ									
	1,5	2,0	2,75	3,0	4,0	5,0	6,0	8,0	10,0	
0	7,940	7,940	7,940	7,940	7,940	7,940	7,940	7,940	7,940	7,940
2	7,907	7,898	7,884	7,880	7,861	7,843	7,825	7,788	7,752	7,752
5	7,737	7,680	7,597	7,570	7,462	7,358	7,255	7,058	6,870	6,870
7	7,546	7,441	7,287	7,236	7,042	6,857	6,680	6,351	6,049	6,049
10	7,173	6,978	6,703	6,616	6,286	5,984	5,708	5,221	4,806	4,806
15	6,371	6,022	5,559	5,419	4,920	4,501	4,145	3,575	3,142	3,142
20	5,472	5,010	4,441	4,278	3,727	3,301	2,962	2,460	2,106	2,106
25	4,592	4,080	3,492	3,332	2,816	2,442	2,158	1,757	1,487	1,487
30	3,806	3,298	2,750	2,607	2,163	1,854	1,626	1,312	1,104	1,104
35	3,143	2,674	2,194	2,072	1,702	1,450	1,268	1,018	0,8539	0,8539
40	2,604	2,190	1,780	1,678	1,372	1,167	1,018	0,8150	0,6817	0,6817
45	2,178	1,820	1,474	1,389	1,134	0,9628	0,8389	0,6699	0,5589	0,5589
50	1,845	1,538	1,245	1,173	0,9567	0,8116	0,7063	0,5625	0,4681	0,4681
55	1,586	1,322	1,070	1,008	0,8223	0,6967	0,6054	0,4808	0,3992	0,3992
60	1,384	1,156	0,9360	0,8816	0,7180	0,6074	0,5270	0,4173	0,3457	0,3457
65	1,227	1,026	0,8305	0,7821	0,6358	0,5368	0,4648	0,3670	0,3033	0,3033
70	1,104	0,9230	0,7466	0,7026	0,5698	0,4800	0,4149	0,3266	0,2694	0,2694
75	1,007	0,8411	0,6789	0,6384	0,5162	0,4337	0,3741	0,2936	0,2417	0,2417
80	0,9295	0,7751	0,6236	0,5858	0,4720	0,3956	0,3405	0,2665	0,2189	0,2189
85	0,8676	0,7213	0,5780	0,5423	0,4354	0,3638	0,3126	0,2439	0,2000	0,2000
90	0,8176	0,6769	0,5399	0,5059	0,4045	0,3371	0,2890	0,2249	0,1841	0,1841
100	0,7434	0,6094	0,4808	0,4494	0,3564	0,2953	0,2522	0,1952	0,1592	0,1592
120	0,6579	0,5270	0,4067	0,3781	0,2951	0,2421	0,2053	0,1575	0,1277	0,1277
140	0,6159	0,4836	0,3665	0,3392	0,2616	0,2129	0,1796	0,1367	0,1104	0,1104
160	0,5959	0,4620	0,3462	0,3195	0,2445	0,1980	0,1664	0,1262	0,1017	0,1017
180	0,5900	0,4555	0,3399	0,3135	0,2392	0,1935	0,1624	0,1230	0,0990	0,0990

Таблица 5.10
Дифференциальное сечение комптоновского рассеяния для энергии фотонов $d\sigma_s(E_0, \theta_s)/d\Omega, 10^{-26} \text{ см}^2/(\text{электрон} \cdot \text{ср}) [10^{-2} \text{ б}/(\text{электрон} \cdot \text{ср})]$

Угол рассеяния θ_s , град	Энергия фотонов источника E_0 , МэВ									
	0,05	0,04	0,05	0,06	0,08	0,1	0,141	0,15	0,2	0,279
0	7,940	7,940	7,940	7,940	7,940	7,940	7,940	7,940	7,940	7,940
2	7,934	7,934	7,934	7,933	7,933	7,932	7,931	7,931	7,930	7,940
5	7,904	7,903	7,901	7,899	7,896	7,892	7,885	7,883	7,874	7,927
7	7,870	7,867	7,863	7,860	7,853	7,846	7,832	7,829	7,812	7,861
10	7,799	7,792	7,785	7,778	7,764	7,751	7,722	7,716	7,682	7,784
15	7,628	7,613	7,597	7,582	7,552	7,522	7,461	7,448	7,375	7,629
20	7,367	7,371	7,345	7,319	7,268	7,218	7,115	7,093	6,972	7,262
25	7,113	7,074	7,036	6,998	6,922	6,848	6,700	6,668	6,495	6,787
30	6,786	6,734	6,682	6,630	6,529	6,430	6,235	6,193	5,968	6,234
35	6,428	6,361	6,295	6,230	6,104	5,981	5,741	5,690	5,419	5,637
40	6,047	5,967	5,888	5,810	5,659	5,514	5,234	5,175	4,866	5,028
45	5,659	5,565	5,474	5,384	5,212	5,048	4,735	4,671	4,334	4,432
50	5,273	5,168	5,065	4,966	4,775	4,596	4,258	4,189	3,835	3,872
55	4,901	4,785	4,673	4,565	4,360	4,169	3,814	3,743	3,380	3,361
60	4,553	4,428	4,308	4,193	3,976	3,776	3,412	3,340	2,977	2,909
65	4,238	4,105	3,978	3,857	3,632	3,427	3,059	2,986	2,629	2,518
70	3,963	3,823	3,690	3,565	3,333	3,124	2,755	2,684	2,335	2,188
75	3,734	3,587	3,449	3,319	3,082	2,870	2,503	2,432	2,093	1,916
80	3,555	3,401	3,258	3,123	2,880	2,665	2,299	2,230	1,900	1,695
85	3,430	3,267	3,117	2,978	2,727	2,509	2,141	2,073	1,749	1,520
90	3,356	3,185	3,026	2,880	2,620	2,397	2,025	1,956	1,636	1,282
100	3,363	3,165	2,985	2,821	2,534	2,291	1,898	1,827	1,500	1,151
120	3,874	3,592	3,340	3,115	2,730	2,415	1,926	1,840	1,457	1,068
140	4,714	4,317	3,968	3,660	3,143	2,730	2,107	2,000	1,534	1,079
160	5,443	4,944	4,510	4,130	3,501	3,005	2,271	2,146	1,612	1,104
180	5,726	5,187	4,719	4,311	3,638	3,110	2,333	2,202	1,642	1,114

Угол рассея- ния θ , град	Энергия фотонов источника E_0 , МэВ										
	0,3	0,4	0,412	0,5	0,511	0,6	0,661	0,8	1,0		
0	7,940	7,940	7,940	7,940	7,940	7,940	7,940	7,940	7,940	7,940	
2	7,927	7,924	7,924	7,921	7,921	7,918	7,917	7,913	7,907	7,907	
5	7,857	7,840	7,838	7,822	7,820	7,805	7,794	7,770	7,736	7,736	
7	7,777	7,743	7,739	7,710	7,706	7,676	7,656	7,610	7,544	7,544	
10	7,615	7,548	7,540	7,482	7,475	7,417	7,378	7,289	7,165	7,165	
15	7,232	7,093	7,077	6,958	6,943	6,826	6,748	6,574	6,335	6,335	
20	6,739	6,517	6,491	6,305	6,283	6,104	5,985	5,728	5,385	5,385	
25	6,167	5,864	5,828	5,581	5,551	5,318	5,167	4,845	4,431	4,431	
30	5,554	5,180	5,138	4,842	4,807	4,536	4,364	4,005	3,562	3,562	
35	4,932	4,507	4,459	4,134	4,096	3,806	3,625	3,258	2,822	2,822	
40	4,326	3,871	3,822	3,485	3,446	3,154	2,976	2,622	2,217	2,217	
45	3,762	3,297	3,247	2,915	2,877	2,597	2,429	2,104	1,742	1,742	
50	3,251	2,793	2,745	2,429	2,393	2,134	1,981	1,690	1,377	1,377	
55	2,801	2,363	2,318	2,025	1,992	1,757	1,621	1,367	1,099	1,099	
60	2,415	2,004	1,963	1,696	1,666	1,457	1,337	1,117	0,8988	0,8988	
65	2,091	1,711	1,673	1,432	1,406	1,220	1,116	0,9248	0,7305	0,7305	
70	1,825	1,475	1,440	1,224	1,200	1,036	0,9439	0,7780	0,6107	0,6107	
75	1,610	1,288	1,256	1,061	1,040	0,8932	0,8115	0,6655	0,5195	0,5195	
80	1,440	1,141	1,113	0,9338	0,9149	0,7826	0,7093	0,5789	0,4494	0,4494	
85	1,309	1,028	1,001	0,8361	0,8186	0,6973	0,6304	0,5120	0,3951	0,3951	
90	1,209	0,9414	0,9161	0,7607	0,7444	0,6312	0,5691	0,4597	0,3524	0,3524	
100	1,080	0,8262	0,8025	0,6582	0,6432	0,5399	0,4837	0,3858	0,2914	0,2914	
120	0,9922	0,7278	0,7038	0,5608	0,5463	0,4475	0,3952	0,3064	0,2240	0,2240	
140	0,9935	0,7014	0,6755	0,5243	0,5092	0,4082	0,3558	0,2691	0,1915	0,1915	
160	1,010	0,6956	0,6682	0,5096	0,4943	0,3908	0,3378	0,2515	0,1759	0,1759	
180	1,018	0,6948	0,6669	0,5060	0,4901	0,3857	0,3325	0,2462	0,1712	0,1712	

Угол рассея- ния θ , град	Энергия фотонов источника E_0 , МэВ										
	1,25	1,5	2,0	2,75	3,0	4,0	5,0	6,0	8,0	10,0	
0	7,940	7,940	7,940	7,940	7,940	7,940	7,940	7,940	7,940	7,940	
2	7,900	7,893	7,879	7,859	7,852	7,824	7,797	7,770	7,716	7,662	
5	7,694	7,651	7,568	7,445	7,405	7,247	7,094	6,946	6,662	6,395	
7	7,463	7,384	7,228	7,004	6,931	6,652	6,388	6,140	5,683	5,275	
10	7,014	6,867	6,586	6,196	6,074	5,617	5,209	4,844	4,218	3,704	
15	6,094	5,791	5,312	4,697	4,515	3,883	3,375	2,960	2,331	1,884	
20	4,997	4,649	4,054	3,353	3,159	2,532	2,076	1,734	1,265	0,9663	
25	3,984	3,602	2,985	2,321	2,149	1,625	1,274	1,028	0,7123	0,5248	
30	3,105	2,731	2,163	1,598	1,459	1,056	0,8020	0,6317	0,4234	0,3047	
35	2,391	2,053	1,566	1,112	1,005	0,7045	0,5238	0,4059	0,2658	0,1882	
40	1,833	1,544	1,143	0,7878	0,7069	0,4846	0,3547	0,2716	0,1748	0,1222	
45	1,412	1,171	0,8480	0,5722	0,5106	0,3443	0,2490	0,1890	0,1199	0,0830	
50	1,099	0,9004	0,6415	0,4260	0,3786	0,2520	0,1805	0,1360	0,0853	0,0586	
55	0,8666	0,7041	0,4955	0,3249	0,2879	0,1896	0,1347	0,1008	0,0626	0,0427	
60	0,6948	0,5608	0,3908	0,2536	0,2240	0,1461	0,1031	0,0767	0,0473	0,0321	
65	0,5671	0,4553	0,3146	0,2022	0,1782	0,1152	0,0807	0,0598	0,0366	0,0247	
70	0,4713	0,3766	0,2582	0,1644	0,1445	0,0926	0,0645	0,0475	0,0289	0,0194	
75	0,3987	0,3170	0,2156	0,1361	0,1193	0,0759	0,0526	0,0386	0,0233	0,0156	
80	0,3429	0,2713	0,1830	0,1145	0,1001	0,0632	0,0435	0,0318	0,0191	0,0127	
85	0,2996	0,2358	0,1577	0,0978	0,0853	0,0534	0,0366	0,0267	0,0160	0,0106	
90	0,2654	0,2077	0,1378	0,0846	0,0736	0,0458	0,0313	0,0227	0,0135	0,0089	
100	0,2163	0,1673	0,1089	0,0657	0,0570	0,0350	0,0237	0,0171	0,0101	0,0066	
120	0,1612	0,1218	0,0767	0,0448	0,0386	0,0232	0,0154	0,0110	0,0064	0,0042	
140	0,1343	0,0996	0,0611	0,0349	0,0298	0,0176	0,0116	0,0083	0,0048	0,0031	
160	0,1215	0,0890	0,0538	0,0303	0,0258	0,0151	0,0099	0,0070	0,0040	0,0026	
180	0,1176	0,0859	0,0516	0,0289	0,0246	0,0144	0,0094	0,0066	0,0038	0,0025	

Энергия фотонов E_{s1} , рассеянных под углом θ_s в результате комптоновского (некогерентного) процесса взаимодействия, МэВ

Таблица 5.11

Угол рассеяния θ_s , град	Энергия фотонов источника E_0 , МэВ										
	0,03	0,04	0,05	0,06	0,08	0,1	0,141	0,15	0,2		
0	0,0300	0,0400	0,0500	0,0600	0,0800	0,1000	0,1410	0,1500	0,2000		
2	0,0300	0,0400	0,0500	0,0600	0,0800	0,1000	0,1410	0,1500	0,2000		
5	0,0300	0,0400	0,0500	0,0600	0,0800	0,0999	0,1409	0,1498	0,1997		
7	0,0300	0,0400	0,0500	0,0599	0,0799	0,0999	0,1407	0,1497	0,1994		
10	0,0300	0,0400	0,0499	0,0599	0,0798	0,0997	0,1404	0,1493	0,1988		
15	0,0299	0,0399	0,0498	0,0598	0,0796	0,0993	0,1397	0,1485	0,1974		
20	0,0299	0,0398	0,0497	0,0596	0,0793	0,0988	0,1387	0,1474	0,1954		
25	0,0298	0,0397	0,0495	0,0593	0,0788	0,0982	0,1374	0,1460	0,1929		
30	0,0298	0,0396	0,0494	0,0591	0,0784	0,0974	0,1360	0,1443	0,1900		
35	0,0297	0,0394	0,0491	0,0588	0,0778	0,0966	0,1343	0,1424	0,1868		
40	0,0296	0,0393	0,0489	0,0584	0,0772	0,0956	0,1324	0,1404	0,1832		
45	0,0295	0,0391	0,0486	0,0580	0,0765	0,0946	0,1305	0,1381	0,1794		
50	0,0294	0,0389	0,0483	0,0576	0,0758	0,0935	0,1283	0,1358	0,1755		
55	0,0293	0,0387	0,0480	0,0571	0,0750	0,0923	0,1262	0,1333	0,1714		
60	0,0291	0,0385	0,0477	0,0567	0,0742	0,0911	0,1239	0,1308	0,1673		
65	0,0290	0,0383	0,0473	0,0562	0,0734	0,0898	0,1216	0,1283	0,1631		
70	0,0289	0,0380	0,0470	0,0557	0,0725	0,0886	0,1193	0,1257	0,1590		
75	0,0287	0,0378	0,0466	0,0552	0,0717	0,0873	0,1171	0,1232	0,1550		
80	0,0286	0,0376	0,0463	0,0547	0,0708	0,0861	0,1148	0,1207	0,1511		
85	0,0285	0,0373	0,0459	0,0542	0,0700	0,0848	0,1126	0,1183	0,1474		
90	0,0283	0,0371	0,0455	0,0537	0,0692	0,0836	0,1105	0,1160	0,1437		
100	0,0281	0,0366	0,0448	0,0527	0,0676	0,0813	0,1065	0,1116	0,1370		
120	0,0276	0,0358	0,0436	0,0510	0,0648	0,0773	0,0997	0,1041	0,1260		
140	0,0272	0,0351	0,0426	0,0497	0,0627	0,0743	0,0948	0,0988	0,1183		
160	0,0269	0,0347	0,0420	0,0489	0,0614	0,0725	0,0918	0,0956	0,1137		
180	0,0268	0,0346	0,0418	0,0486	0,0609	0,0719	0,0909	0,0945	0,1122		

Продолжение табл. 5.11

Угол рассеяния θ_s , град	Энергия фотонов источника E_0 , МэВ										
	0,279	0,3	0,4	0,412	0,5	0,511	0,6	0,661	0,8	1,0	
0	0,2790	0,3000	0,4000	0,4120	0,5000	0,5110	0,6000	0,6610	0,8000	1,0000	
2	0,2789	0,2999	0,3998	0,4118	0,4997	0,5107	0,5996	0,6605	0,7992	0,9988	
5	0,2784	0,2993	0,3998	0,4107	0,4981	0,5091	0,5973	0,6578	0,7953	0,9926	
7	0,2779	0,2987	0,3977	0,4095	0,4964	0,5072	0,5948	0,6546	0,7907	0,9855	
10	0,2767	0,2973	0,3953	0,4070	0,4927	0,5033	0,5895	0,6483	0,7814	0,9711	
15	0,2739	0,2941	0,3896	0,4010	0,4839	0,4941	0,5769	0,6331	0,7595	0,9374	
20	0,2701	0,2897	0,3820	0,3929	0,4721	0,4819	0,5603	0,6132	0,7310	0,8945	
25	0,2654	0,2844	0,3727	0,3831	0,4580	0,4672	0,5405	0,5895	0,6977	0,8450	
30	0,2600	0,2781	0,3620	0,3718	0,4420	0,4506	0,5184	0,5634	0,6613	0,7922	
35	0,2539	0,2712	0,3504	0,3596	0,4248	0,4328	0,4949	0,5357	0,6235	0,7387	
40	0,2474	0,2638	0,3381	0,3466	0,4068	0,4141	0,4707	0,5074	0,5855	0,6859	
45	0,2405	0,2560	0,3254	0,3333	0,3886	0,3952	0,4465	0,4794	0,5485	0,6357	
50	0,2335	0,2480	0,3126	0,3199	0,3705	0,3765	0,4227	0,4521	0,5131	0,5886	
55	0,2263	0,2399	0,2999	0,3066	0,3528	0,3582	0,3998	0,4260	0,4797	0,5451	
60	0,2192	0,2319	0,2875	0,2936	0,3357	0,3407	0,3781	0,4014	0,4487	0,5054	
65	0,2121	0,2241	0,2755	0,2811	0,3195	0,3240	0,3576	0,3784	0,4202	0,4695	
70	0,2053	0,2164	0,2640	0,2692	0,3042	0,3082	0,3385	0,3571	0,3941	0,4371	
75	0,1986	0,2090	0,2531	0,2579	0,2898	0,2935	0,3208	0,3375	0,3703	0,4081	
80	0,1923	0,2020	0,2429	0,2473	0,2765	0,2798	0,3045	0,3195	0,3488	0,3821	
85	0,1862	0,1953	0,2333	0,2373	0,2641	0,2671	0,2896	0,3031	0,3293	0,3589	
90	0,1805	0,1890	0,2244	0,2281	0,2527	0,2555	0,2760	0,2882	0,3118	0,3382	
100	0,1700	0,1776	0,2085	0,2117	0,2327	0,2351	0,2523	0,2625	0,2820	0,3033	
120	0,1534	0,1595	0,1840	0,1865	0,2026	0,2044	0,2173	0,2248	0,2389	0,2541	
140	0,1420	0,1473	0,1679	0,1700	0,1833	0,1847	0,1952	0,2013	0,2125	0,2244	
160	0,1355	0,1403	0,1588	0,1607	0,1725	0,1738	0,1831	0,1884	0,1982	0,2085	
180	0,1334	0,1380	0,1559	0,1577	0,1691	0,1703	0,1792	0,1843	0,1937	0,2035	

Угол рассеяния θ , град	Энергия фотонов источника E_0 , МэВ									
	1,25	1,5	2,0	2,75	3,0	4,0	5,0	6,0	8,0	10,0
0	1,2500	1,5000	2,0000	2,7500	3,0000	4,0000	5,0000	6,0000	8,0000	10,000
2	1,2482	1,4974	1,9953	2,7411	2,9895	3,9813	4,9708	5,9580	7,9256	9,8839
5	1,2385	1,4835	1,9707	2,6949	2,9345	3,8845	4,8208	5,7437	7,5508	9,3078
7	1,2275	1,4677	1,9430	2,6433	2,8735	3,7782	4,6582	5,5144	7,1594	8,7201
10	1,2052	1,4359	1,8877	2,5421	2,7542	3,5747	4,3526	5,0913	6,4622	7,7074
15	1,1538	1,3635	1,7645	2,3236	2,4996	3,1572	3,7491	4,2845	5,2156	5,9977
20	1,0893	1,2744	1,6181	2,0762	2,2156	2,7174	3,1446	3,5128	4,1152	4,5871
25	1,0169	1,1764	1,4633	1,8281	1,9354	2,3075	2,6085	2,8569	3,2429	3,5290
30	0,9414	1,0765	1,3119	1,5978	1,6791	1,9522	2,1634	2,3316	2,5824	2,7607
35	0,8667	0,9799	1,1712	1,3938	1,4553	1,6561	1,8057	1,9213	2,0885	2,2035
40	0,7950	0,8892	1,0439	1,2172	1,2638	1,4126	1,5199	1,6010	1,7155	1,7924
45	0,7282	0,8065	0,9318	1,0674	1,1031	1,2148	1,2933	1,3516	1,4323	1,4855
50	0,6671	0,7322	0,8340	0,9410	0,9687	1,0537	1,1123	1,1552	1,2136	1,2515
55	0,6118	0,6662	0,7494	0,8347	0,8563	0,9221	0,9667	0,9989	1,0423	1,0702
60	0,5623	0,6079	0,6764	0,7451	0,7623	0,8140	0,8486	0,8733	0,9062	0,9272
65	0,5182	0,5566	0,6135	0,6695	0,6834	0,7247	0,7519	0,7712	0,7969	0,8130
70	0,4790	0,5117	0,5594	0,6056	0,6169	0,6503	0,6722	0,6876	0,7079	0,7206
75	0,4443	0,4723	0,5127	0,5512	0,5606	0,5881	0,6059	0,6184	0,6347	0,6450
80	0,4137	0,4378	0,4723	0,5048	0,5127	0,5356	0,5503	0,5606	0,5740	0,5823
85	0,3867	0,4077	0,4374	0,4651	0,4718	0,4911	0,5034	0,5120	0,5232	0,5301
90	0,3627	0,3812	0,4070	0,4309	0,4366	0,4531	0,4636	0,4709	0,4803	0,4862
100	0,3229	0,3375	0,3576	0,3759	0,3802	0,3927	0,4005	0,4060	0,4129	0,4172
120	0,2677	0,2776	0,2911	0,3031	0,3059	0,3139	0,3189	0,3224	0,3268	0,3294
140	0,2350	0,2426	0,2528	0,2618	0,2639	0,2698	0,2735	0,2760	0,2793	0,2812
160	0,2176	0,2241	0,2328	0,2404	0,2422	0,2472	0,2503	0,2524	0,2550	0,2567
180	0,2121	0,2183	0,2266	0,2338	0,2346	0,2402	0,2431	0,2451	0,2476	0,2491

где r_s — классический радиус электрона; $r_s^2 = 7,940 \cdot 10^{-26}$ см²; $\alpha_0 = E_0 / (m_0 c^2)$; $m_0 c^2$ — энергия массы покоя электрона; $m_0 c^2 = 0,511$ МэВ.

§ 5.2. УГЛОВЫЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ РАССЕЯННОГО ФОТОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ЗА ЗАЩИТНЫМИ БАРЬЕРАМИ

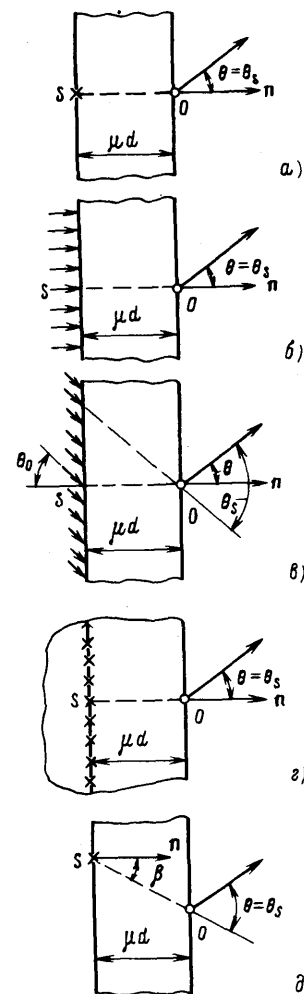


Рис. 5.2. Геометрия задач по исследованию углового распределения рассеянного излучения:

S — источник; θ — угол детектирования; θ_s — угол рассеяния

В [72, 85—89], исходя из анализа закономерностей формирования поля рассеянного фотонного излучения, экспериментальной и расчетной (для источников с энергией $E_0 = 0,145 \div 7,0$ МэВ и толщины среды от 1,5 до 7 длин свободного пробега) информации, предложены приводимые ниже формулы для описания угловых распределений рассеянного фотонного излучения на границе защитных барьеров.

Плотность потока энергии покидающего барьер толщиной μd из материала с атомным номером Z через единичную площадку вблизи точки O (рис. 5.2, а—д), расположенной на внешней по отношению к источнику поверхности барьера, в единицу времени, в единичный телесный угол в направлении θ , отсчитываемом от нормали к поверхности барьера, для моноэнергетического источника с энергией фотонов E_0 может быть рассчитана по формулам [88, 89]:

для плоского изотропного источника (рис. 5.2, г)

$$I^{n,n}(E_0, d, \theta) = C^{n,n} \cos^{k-1} \theta; \quad (5.11)$$

для плоского мононаправленного источника при нормальном падении излучения на барьер ($\theta_0 = 0$) (рис. 5.2, б)

$$I^{n,m}(E_0, \theta_0 = 0^0, d, \theta) = \sum_{i=1}^n (-1)^{i-1} \times C_i^{n,m} \exp(-\theta/\theta_i^{n,m}); \quad (5.12)$$

при энергии фотонов источника $E_0 \leq 2$ МэВ $n=2$ и формула (5.12) принимает вид

$$I^{n,m}(E_0, \theta_0 = 0^0, d, \theta) = C_1^{n,m} \exp(-\theta/\theta_1^{n,m}) - C_2^{n,m} \exp(-\theta/\theta_2^{n,m}); \quad (5.13)$$

при энергии фотонов $2 \text{ МэВ} < E_0 \leq 7 \text{ МэВ}$ $n=3$ и формула (5.12) принимает вид

$$I^{n,m}(E_0, \theta_0 = 0^0, d, \theta) = C_1^{n,m} \exp(-\theta/\theta_1^{n,m}) -$$

$$-C_2^{n,m} \exp(-\theta/\theta_2^{n,m}) + C_3^{n,m} \exp(-\theta/\theta_3^{n,m}); \quad (5.14)$$

для плоского источника с произвольным угловым распределением фотонов вида $(n+1)\cos^n\theta_0/(2\pi)$

$$I^{n,m}(E_0, d, \theta) = p_1 I^{n,m}(E_0, \theta_0=0^0, d, \theta) + p_2 I^{n,m}(E_0, d, \theta); \quad (5.15)$$

для точечного изотропного источника (рис. 5.2, а)

$$I^{n,m}(E_0, d, \theta) = \sum_{i=1}^n (-1)^{i-1} C_i^{n,m} \exp(-\theta/\theta_i^{n,m}) / \sin\theta; \quad (5.16)$$

при энергии фотонов $E_0 < 2,75$ МэВ $n=2$ и формула (5.16) принимает вид

$$I^{n,m}(E_0, d, \theta) = (C^{n,m} / \sin\theta) [\exp(-\theta/\theta_1^{n,m}) - \exp(-\theta/\theta_2^{n,m})], \quad (5.17)$$

В формулах (5.11)–(5.17) $C^{n,m}$, $C_i^{n,m}$, $C_i^{n,m}$ — нормировочные множители, определяемые из условия нормировки рассеянного излучения на границе среды; для плоского изотропного источника

$$k = 1,1(\mu d)^{[0,8 + \lg(0,1E_0)(\frac{1,6}{Z} + 0,02)]}, \quad (5.18)$$

где E_0 выражено в МэВ; $\theta_1^{n,m}$, $\theta_2^{n,m}$ — характеристические углы для i -го члена суммы; значения $\theta_1^{n,m}$, $\theta_2^{n,m}$ с погрешностью примерно до 10% не зависят от d при $\mu d \geq 1,5 \div 2,0$; значения $\theta_1^{n,m}$ приведены в табл. 5.12, значения $\theta_2^{n,m}$ — на рис. 5.3, для определения $\theta_2^{n,m}$ с погрешностью до 20% можно использовать соотношение

$$\theta_1^{n,m} / \theta_2^{n,m} = \theta_1^{n,m} / \theta_2^{n,m}; \quad (5.19)$$

величины $I^{n,m}(E_0, d, \theta)$; $I^{n,m}(E_0, \theta_0=0^0, d, \theta)$; $I^{n,m}(E_0, d, \theta)$ в выражении (5.15) нормированы на 1 фотон, покидающий в единицу времени единичную поверхность источника в направлении защиты.

Таблица 5.12

Значение характеристического угла $\theta_1^{n,m}$ для плоских мононаправленных источников при $\theta_0=0^0$ (без учета аннигиляционного излучения), град

Материал	Энергия источника E_0 , МэВ															
	0,145		0,279		0,662		1,25		2,75		7,0					
	$\theta_1^{n,m}$	$\theta_2^{n,m}$	$\theta_1^{n,m}$	$\theta_2^{n,m}$	$\theta_1^{n,m}$	$\theta_2^{n,m}$	$\theta_1^{n,m}$	$\theta_2^{n,m}$	$\theta_1^{n,m}$	$\theta_2^{n,m}$	$\theta_3^{n,m}$	A	$\theta_1^{n,m}$	$\theta_2^{n,m}$	$\theta_3^{n,m}$	A
Вода	43	22	42	16,5	35	10	25	6,3	11	4,1	31	4,53	7,0	3,2	23,0	18,8
Алюминий	38	20	39	16	32	9,8	24	5,8	10	4,1	28	4,30	7,0	3,2	19,8	8,3
Железо	26	10,5	32	11,5	29	9,4	22,5	5,5	9,5	4,1	25	3,2	7,0	3,2	19,0	6,72
Свинец	18,5	9,5	19,5	9,5	17,5	7,5	15	5,2	9	3,9	19	3,1	6,7	3,2	16	4,66

* Константы рассчитаны с учетом аннигиляционного излучения для толщины защиты $d \approx 2/\mu$.

Нормировочные множители определяют из следующих нормировочных выражений:
для соотношения (5.11)

$$I^{n,m}(E_0, d) = \int_0^{2\pi} d\varphi \int_0^{\pi/2} I^{n,m}(E_0, d, \theta) \sin\theta d\theta = I_0 E_1(\mu d) (B_3^{n,m} - 1); \quad (5.20)$$

для соотношения (5.13)

$$I^{n,m}(E_0, \theta_0=0^0, d) = \int_0^{2\pi} d\varphi \int_0^{\pi/2} I^{n,m}(E_0, \theta_0=0^0, d, \theta) \sin\theta d\theta = I_0 e^{-\mu d} (B_3^{n,m} - 1); \quad (5.21)$$

$$[I^{n,m}(E_0, \theta_0=0^0, d, \theta)]_{\theta=0^0} = 0; \quad (5.22)$$

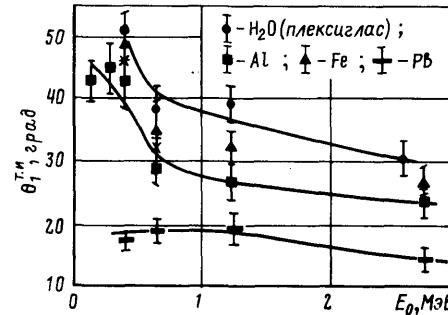


Рис. 5.3. Зависимость величины $\theta_1^{n,m}$ от энергии фотонов для воды (плексигласа), алюминия, железа и свинца. Экспериментальные точки нанесены по данным разных авторов

для соотношения (5.14) к нормировочным выражениям (5.21), (5.22) добавляется условие

$$[I^{n,m}(E_0, \theta_0=0^0, d, \theta)]_{\theta=\theta_{пер}} = 0; \quad (5.23)$$

для соотношения (5.17)

$$I^{n,m}(E_0, d) = \int_0^{2\pi} d\varphi \int_0^{\pi/2} I^{n,m}(E_0, d, \theta) \sin\theta d\theta = I_{нр}^{n,m} (B_3^{n,m} - 1), \quad (5.24)$$

где I_0 — энергия, испускаемая с единицы поверхности плоского источника в единицу времени в полупространство в направлении защиты; $I_{нр}^{n,m}$ — плотность потока энергии нерассеянного излучения на выходе из защиты; B_3^j — энергетический фактор накопления для j -го вида источника для точки O (рис. 5.2) на внешней границе защиты; $E_1(\mu d)$ — интегральная показательная функция; $\theta_{пер}$ — угол перегиба, соответствует углам, при которых наблюдается точка перегиба в зависимости $I^{n,m}(E_0, \theta_0=0, d, \theta)$ от θ .

Решение приведенных выше нормировочных соотношений приводит к следующим значениям нормировочных множителей:

для плоского изотропного источника [формула (5.11)]

$$C^{n,m} = I_0 (B_3^{n,m} - 1) k E_1(\mu d) / (2\pi); \quad (5.25)$$

для плоского мононаправленного источника при $n=2$ [формула (5.13)]

§ 5.3. ФАКТОРЫ НАКОПЛЕНИЯ ГОМОГЕННЫХ СРЕД

Рассеянное в среде первичное излучение источника и вторичные излучения удобно учитывать, введя в закон ослабления фотонного излучения в геометрии узкого пучка множителем фактор накопления.

Если обозначить через G_1 некоторый функционал, описывающий поле нерассеянного первичного излучения, а через G_2 — функционал, описывающий поле рассеянного первичного и вторичного и нерассеянного вторичного излучений, то фактор накопления по данному регистрируемому эффекту:

$$B_G = \frac{G_1 + G_2}{G_1} = 1 + \frac{G_2}{G_1} \geq 1. \quad (5.39)$$

Таким образом, фактор накопления равен кратности превышения полной характеристики поля (нерассеянного и рассеянного первичного и вторичного излучения) над характеристиками поля нерассеянного первичного излучения или, иными словами, характеризует отношение показаний детектора в геометрии широкого пучка к показанию детектора в геометрии узкого пучка.

Фактор накопления зависит от всех условий задачи: регистрируемого эффекта, характеристик источника (энергетического состава, геометрии и углового распределения излучения), характеристик защитной среды (геометрии защиты, в том числе ее толщины, атомного номера материала среды, компоновки защиты), взаимного расположения источника, защиты и детектора и т. д.

Для различных регистрируемых эффектов различают следующие виды факторов накопления, записанных ниже для моноэнергетических источников с энергией E_0 :

числовой (для плотности потока фотонов)

$$B_n(d) = \frac{\int_0^{E_0} \varphi(d, E) dE}{\varphi_0(d)}; \quad (5.40)$$

энергетический (для плотности потока энергии фотонов)

$$B_s(d) = \frac{\int_0^{E_0} \varphi(d, E) E dE}{\varphi_0(d) E_0}; \quad (5.41)$$

дозовый (для поглощенной дозы в воздухе, для экспозиционной дозы)

$$B_d(d) = \frac{\int_0^{E_0} \varphi(d, E) E \mu_{en}^{возд}(E) dE}{\varphi_0(d) E_0 \mu_{en}^{возд}(E_0)}; \quad (5.42)$$

поглощенной энергии (для поглощенной в среде энергии)

$$B_n(d) = \frac{\int_0^{E_0} \varphi(d, E) E \mu_{en}^{сп}(E) dE}{\varphi_0(d) E_0 \mu_{en}^{сп}(E_0)}; \quad (5.43)$$

кермы (для кермы в среде)

$$B_k(d) = \frac{\int_0^{E_0} \varphi(d, E) E \mu_{tr}^{сп}(E) dE}{\varphi_0(d) E_0 \mu_{tr}^{сп}(E_0)}, \quad (5.44)$$

где $\varphi(d, E)$ — пространственно-энергетическое распределение плотности потока нерассеянного и рассеянного первичного и вторичного излучения; $\varphi_0(d)$ — пространственное распределение плотности потока нерассеянного в среде первичного излучения; $\mu_{en}^{возд}(E)$, $\mu_{en}^{сп}(E)$ — коэффициенты поглощения энергии фотонов в воздухе и в некоторой среде соответственно; $\mu_{tr}^{сп}(E)$ — коэффициент передачи энергии фотонов в некоторой среде.

При пользовании факторами накопления (табл. 5.13—5.20) полезно помнить следующие закономерности:

1. Энергетический фактор накопления всегда меньше числового.
2. Дозовый фактор накопления обычно больше энергетического, за исключением области энергий фотонов около 0,5 МэВ, где энергетический фактор накопления может быть немного больше дозового, особенно для средних по атомному номеру сред.
3. Дозовый фактор накопления по экспозиционной дозе тождественно равен фактору накопления поглощенной энергии в воздухе при наличии равновесия заряженных частиц. Фактор накопления кермы в воздухе совпадает с дозовым фактором накопления, если можно пренебречь долей энергии вторичных заряженных частиц g , переходящей в тормозное излучение. Для воздуха и энергии радионуклидных источников $g \leq 0,01$, для $E_0 \leq 10$ МэВ $g \leq 0,04$. Поэтому отмеченное утверждение с этими небольшими погрешностями можно считать справедливым.
4. Факторы накопления, рассчитанные по керме в некоторой среде, могут использоваться как факторы накопления поглощенной дозы в этой среде, если можно пренебречь тормозным излучением и имеет место электронное равновесие.
5. Для легких и средних по атомному номеру сред при $E_0 \leq E_{мин}$ [$E_{мин}$ — энергия, соответствующая минимуму зависимости $\mu = \mu(E)$] фактор накопления увеличивается с уменьшением начальной энергии, имеет максимум при $E_0 \approx 100 \div 200$ кэВ и затем убывает с уменьшением энергии фотона. При большой толщине защиты для $E_0 \geq 2 \div 3$ МэВ фактор накопления больше для более тяжелых сред. В тяжелых средах фактор накопления мал, он возрастает с увеличением E_0 , при малой толщине проходит через максимум в области 1—2 МэВ, а затем с ростом E_0 убывает.
6. При увеличении протяженности источника фактор накопления возрастает.
7. При увеличении изотропии углового распределения излучения источника фактор накопления возрастает.
8. Фактор накопления монотонно возрастает с увеличением толщины защиты.

Дозовые факторы накопления для точечного изотропного

E ₀ , МэВ	μd						
	0,5	1	2	3	4	5	6

Воздух [105]. Факторы накопления по керме в воздухе. Учтено аннигиляционное излучение. Вклад тормозного излучения можно оценить из данных настоящей таблицы.

0,015	1,12	1,17	1,25	1,31	1,36	1,39	1,43	1,46
0,02	1,27	1,41	1,62	1,79	1,93	2,04	2,15	2,25
0,03	1,76	2,31	3,19	3,99	4,75	5,46	6,14	6,79
0,04	2,20	3,38	5,85	8,47	11,2	14,1	17,0	20,1
0,05	2,48	4,28	8,72	14,1	20,5	27,6	35,7	44,6
0,06	2,58	4,76	10,8	18,9	29,1	41,5	56,1	73,2
0,08	2,52	4,83	12,0	22,9	37,9	57,4	82,0	112
0,1	2,35	4,46	11,4	22,5	38,4	59,9	87,8	123
0,15	2,16	3,83	9,21	18,2	31,5	49,9	74,2	105
0,2	1,90	3,28	7,74	15,0	25,6	40,0	58,9	82,8
0,3	1,75	2,83	6,20	11,4	18,7	28,2	40,2	54,9
0,4	1,66	2,59	5,37	9,45	14,9	21,8	30,2	40,2
0,5	1,60	2,44	4,84	8,21	12,6	17,9	24,2	31,6
0,6	1,56	2,33	4,46	7,34	10,9	15,3	20,3	26,0
0,8	1,50	2,17	3,94	6,19	8,88	12,0	15,5	19,4
1,0	1,47	2,08	3,60	5,46	7,60	10,0	12,7	15,6
1,5	1,42	1,92	3,09	4,42	5,86	7,42	9,08	10,8
2,0	1,38	1,83	2,81	3,86	4,96	6,13	7,35	8,61
3,0	1,34	1,71	2,46	3,22	4,00	4,79	5,60	6,43
4,0	1,31	1,63	2,25	2,85	3,46	4,07	4,69	5,31
5,0	1,29	1,57	2,09	2,60	3,11	3,61	4,12	4,62
6,0	1,27	1,52	1,97	2,41	2,85	3,28	3,71	4,14
8,0	1,23	1,43	1,80	2,15	2,50	2,84	3,17	3,51
10,0	1,20	1,37	1,68	1,97	2,26	2,54	2,82	3,10
15,0	1,15	1,28	1,49	1,70	1,90	2,11	2,30	2,50

Вода*² [105, 110]. Фактор накопления по керме в воздухе. Учтено излучение. Для E₀=8 ÷ 15 МэВ во второй строке приводятся факторы

0,015	1,13	1,18	1,27	1,33	1,38	1,43	1,46	1,50
0,02	1,28	1,43	1,63	1,86	2,02	2,16	2,28	2,39
0,03	1,77	2,35	3,32	4,21	5,07	5,89	6,68	7,45
0,04	2,22	3,47	6,18	9,14	12,3	15,7	19,2	22,9
0,05	2,52	4,42	9,25	15,3	22,6	31,0	40,5	51,3
0,06	2,62	4,90	11,4	20,4	32,0	46,4	63,6	83,9
0,08	2,55	4,95	12,6	24,5	41,1	63,3	91,4	126
0,1	2,37	4,55	11,8	23,8	41,3	65,2	96,7	137
0,15	2,07* ³	3,89	9,49	19,0	33,3	53,4	80,1	115
0,2	1,92* ³	3,42* ³	8,31	16,0	27,0	42,2	62,5	88,5
0,3	1,75	2,85	6,30	11,7	19,3	29,4	42,1	57,8
0,4	1,66	2,61	5,44	9,66	15,3	22,5	31,4	41,9
0,5	1,60	2,44	4,88	8,35	12,8	18,4	25,0	32,7
0,6	1,56	2,33	4,49	7,44	11,2	15,6	20,8	26,7
0,8	1,50	2,17	3,96	6,26	9,00	12,2	15,8	19,8
1,0	1,47	2,08	3,62	5,50	7,68	10,1	12,8	15,8
1,5	1,41	1,92	3,10	4,43	5,88	7,44	9,11	10,9
2,0	1,38	1,83	2,81	3,87	4,98	6,15	7,38	8,65
3,0	1,34	1,71	2,46	3,23	4,00	4,80	5,61	6,43

Таблица 5.13

источника в бесконечной среде*¹

								E ₀ , МэВ
8	10	15	20	25	30	35	40	

ное излучение, не учтено тормозное и флуоресцентное излучение для воды.

1,48	1,53	1,62	1,68	1,74	1,78	1,82	1,85	0,015
2,34	2,50	2,83	3,11	3,35	3,56	3,74	3,88	0,02
7,43	8,69	11,8	14,8	18,0	21,5	25,4	29,7	0,03
23,3	30,0	49,0	71,4	97,2	126	159	195	0,04
54,4	76,8	151	256	395	574	798	1070	0,05
92,7	140	316	596	1010	1600	2410	3480	0,06
148	242	636	1350	2540	4390	7140	11100	0,08
166	282	800	1810	3570	6430	10600	15700	0,1
144	249	735	1700	3410	6210	10500	17000	0,15
112	192	545	1220	2360	4150	6770	10500	0,2
72,7	118	304	624	1120	1820	2770	4010	0,3
52,0	81,1	191	365	611	938	1350	1870	0,4
40,1	60,6	134	241	385	567	788	1050	0,5
32,5	47,9	100	173	266	379	512	665	0,6
23,7	33,5	64,9	105	154	210	274	345	0,8
18,8	25,8	47,0	72,8	103	136	173	212	1,0
12,7	16,7	27,7	40,2	53,9	68,5	84,0	100	1,5
9,92	12,6	20,0	27,9	36,2	45,0	54,0	63,2	2,0
7,26	8,97	13,4	17,9	22,5	27,2	32,0	36,7	3,0
5,94	7,19	10,3	13,5	16,7	19,9	23,1	26,3	4,0
5,12	6,13	8,63	11,1	13,6	16,1	18,5	21,0	5,0
4,57	5,42	7,51	9,58	11,6	13,6	15,4	16,9	6,0
3,84	4,49	6,08	7,64	9,17	10,7	12,3	14,1	8,0
3,37	3,92	5,25	6,55	7,84	9,11	10,4	11,6	10,0
2,70	3,08	4,03	4,96	5,87	6,75	7,58	8,31	15,0

аннигиляционное и тормозное излучение, не учтено флуоресцентное накопления без учета тормозного излучения.

1,53	1,58	1,68	1,75	1,82	1,87	1,91	1,94	0,015
2,50	2,68	3,08	3,42	3,71	3,97	4,19	4,36	0,02
8,20	9,69	13,5	17,2	21,2	25,7	30,7	36,3	0,03
26,8	35,1	59,2	88,5	123	163	208	259	0,04
63,2	90,9	185	323	511	759	1080	1470	0,05
107	165	386	751	1310	2110	3240	4740	0,06
169	281	762	1660	3200	5630	9300	14600	0,08
187	321	938	2170	4360	7970	13500	21100	0,1
158	277	834	1960	3980	7320	12500	20300	0,15
121	208	600	1350	2670	4810	8170	13300	0,2
76,8	126	327	676	1220	1990	3040	4410	0,3
54,3	85,0	202	387	649	999	1440	1990	0,4
41,5	62,9	139	252	403	594	828	1110	0,5
33,5	49,3	104	179	276	395	534	695	0,6
24,2	34,2	66,3	108	157	215	281	353	0,8
19,0	26,1	47,7	74,0	104	139	177	218	1,0
12,7	16,7	27,8	40,4	54,0	68,7	84,3	101	1,5
9,97	12,7	20,1	28,0	36,5	45,2	54,4	63,7	2,0
7,27	8,97	13,3	17,8	22,4	27,1	31,8	36,5	3,0

E ₀ , МэВ	μd							
	0,5	1	2	3	4	5	6	7
4,0	1,31	1,63	2,24	2,85	3,46	4,07	4,68	5,30
5,0	1,28	1,56	2,08	2,58	3,08	3,58	4,08	4,58
6,0	1,27	1,51	1,97	2,41	2,84	3,27	3,70	4,12
8,0	1,25	1,46	1,84	2,20	2,54	2,88	3,21	3,55
	1,23	1,43	1,80	2,15	2,49	2,82	3,15	3,48
10,0	1,23	1,41	1,73	2,03	2,31	2,60	2,87	3,14
	1,20	1,37	1,68	1,97	2,25	2,53	2,80	3,07
15,0	1,19	1,33	1,57	1,79	2,00	2,21	2,42	2,61
	1,15	1,28	1,49	1,70	1,90	2,10	2,30	2,49

Бетон*^{2,4} [100, 110]. Фактор накопления по керме в воздухе. Учтено излучение. Для E₀=10 ÷ 15 МэВ во второй строке приводятся факторы

0,015	1,02	1,03	1,04	1,05	1,05	1,06	1,06	1,07
0,02	1,05	1,07	1,09	1,11	1,13	1,14	1,15	1,16
0,03	1,15	1,21	1,30	1,37	1,43	1,47	1,51	1,54
0,04	1,30	1,46	1,69	1,87	2,01	2,14	2,25	2,35
0,05	1,42	1,74	2,26	2,63	2,95	3,25	3,53	3,79
0,06	1,68	2,15	2,89	3,54	4,17	4,77	5,34	5,90
0,08	1,84	2,58	3,96	5,31	6,69	8,09	9,52	11,0
0,1	1,89	2,78	4,63	6,63	8,80	11,1	13,6	16,3
0,15	1,84	2,82	5,13	7,92	11,2	15,0	19,3	24,2
0,2	1,78	2,72	5,05	8,00	11,6	15,9	20,9	26,7
0,3	1,68	2,52	4,66	7,42	10,8	15,0	19,9	25,6
0,4	1,61	2,37	4,31	6,80	9,85	13,5	17,8	22,8
0,5	1,57	2,27	4,03	6,26	8,97	12,2	15,9	20,2
0,6	1,53	2,18	3,80	5,82	8,25	11,1	14,3	18,0
0,8	1,48	2,06	3,47	5,18	7,18	9,47	12,0	14,9
1,0	1,45	1,98	3,24	4,72	6,42	8,33	10,4	12,7
1,5	1,39	1,85	2,86	4,00	5,25	6,60	8,05	9,58
2,0	1,37	1,77	2,65	3,60	4,61	5,68	6,80	7,97
3,0	1,33	1,67	2,38	3,09	3,84	4,61	5,40	6,20
4,0	1,31	1,61	2,18	2,77	3,37	3,98	4,60	5,23
5,0	1,27	1,53	2,04	2,53	3,03	3,54	4,05	4,57
6,0	1,26	1,49	1,93	2,37	2,80	3,25	3,69	4,14
8,0	1,22	1,41	1,76	2,11	2,45	2,81	3,16	3,51
10,0	1,23	1,42	1,73	2,03	2,34	2,64	2,94	3,26
	1,19	1,35	1,64	1,93	2,22	2,51	2,80	3,10
15,0	1,21	1,36	1,62	1,85	2,07	2,28	2,54	2,78
	1,15	1,26	1,46	1,66	1,86	2,07	2,28	2,50

Алюминий [90, 95]. Факторы накопления по керме в воздухе без учета анализа данных этой таблицы для бетона.

0,05	1,7	3,6	6,2	10
0,10	2,9	5,8	13	25
0,20	2,9	5,5	12	27
0,30	2,8	5,0	11	24
0,40	2,5	4,5	9,9	22
0,50	2,37	4,24	9,47	21,5
0,662* ³	2,18	3,85	8,16	17,3
1,0	2,02	3,31	6,57	13,1
1,25* ³	1,92	3,06	5,90	11,3

E ₀ , МэВ	μd							
	8	10	15	20	25	30	35	40
4,0	5,92	7,16	10,3	13,4	16,5	19,7	22,8	25,9
5,0	5,07	6,05	8,49	10,9	13,3	15,7	18,0	20,4
6,0	4,54	5,37	7,41	9,42	11,4	13,3	15,0	16,4
8,0	3,87	4,52	6,10	7,62	9,11	10,6	12,1	13,6
	3,80	4,44	5,99	7,49	8,96	10,4	11,9	13,4
10,0	3,42	3,96	5,26	6,52	7,75	8,98	10,2	11,5
	3,34	3,86	5,14	6,38	7,59	8,78	9,96	11,2
15,0	2,82	3,20	4,14	5,05	5,92	6,77	7,54	8,22
	2,68	3,05	3,96	4,84	5,69	6,51	7,26	7,91

аннигиляционное и тормозное излучение, не учтено флуоресцентное накопления без учета тормозного излучения.

1,07	1,08	1,09	1,10	1,10	1,11	1,11	1,11	0,015
1,17	1,18	1,21	1,22	1,24	1,25	1,26	1,27	0,02
1,57	1,63	1,74	1,82	1,89	1,94	1,99	2,02	0,03
2,45	2,62	2,98	3,27	3,51	3,73	3,91	4,03	0,04
4,04	4,51	5,57	6,52	7,38	8,18	8,87	9,44	0,05
6,44	7,52	10,2	12,7	15,2	18,2	21,9	26,5	0,06
12,5	15,7	24,3	33,8	44,3	55,4	66,8	78,1	0,08
19,2	25,6	44,9	69,1	97,9	131	170	214	0,1
29,7	42,7	87,6	153	240	353	494	664	0,15
33,4	49,6	109	201	331	507	734	1020	0,2
32,2	48,2	107	198	326	497	716	985	0,3
28,5	42,1	90,7	162	259	383	536	719	0,4
25,0	36,4	75,6	131	203	292	399	523	0,5
22,2	31,8	63,6	107	161	226	302	389	0,6
18,1	25,1	47,4	75,7	110	149	193	242	0,8
15,2	20,7	37,2	57,1	80,1	106	134	164	1,0
11,2	14,6	24,2	35,0	46,9	59,6	73,0	87,1	1,5
9,18	11,7	18,6	26,0	33,9	42,2	50,9	59,8	2,0
7,03	8,71	13,1	17,7	22,5	27,4	32,4	37,4	3,0
5,86	7,15	10,5	13,9	17,4	20,9	24,6	28,4	4,0
5,09	6,15	8,85	11,6	14,4	17,3	20,5	24,8	5,0
4,60	5,52	7,86	10,2	12,7	15,2	17,8	20,5	6,0
3,87	4,59	6,43	8,31	10,2	12,2	14,1	16,2	8,0
3,57	4,20	5,80	7,47	9,18	11,0	12,8	15,0	10,0
3,40	4,01	5,57	7,19	8,86	10,6	12,3	14,5	15,0
3,02	3,50	4,76	6,09	7,51	8,94	10,4	11,7	15,0
2,71	3,16	4,34	5,59	6,91	8,27	9,63	10,9	15,0

вторичного излучения. Оценить роль вторичного излучения можно из

12	16	19	25	30	35	40	45	0,05
57	130	290	500	800	1100	1400	1700	0,10
73	230	500	800	1100	1400	1700	2100	0,20
58	160	310	480	650	820	1000	1200	0,30
48	120	220	340	460	580	710	850	0,40
38,9	80,8	141	210	280	350	430	510	0,50
30,0	66,4	104	150	200	250	310	370	0,662* ³
21,2	37,9	58,5	82,0	105	130	155	185	1,0
17,4	29,8	45,5	65,0	85,0	105	125	150	1,25* ³

E ₀ , МэВ	μd							
	0,5	1	2	3	4	5	6	7
2,0		1,75	2,61		4,62			8,05
2,75* ³		1,66	2,39		3,92			6,50
3,0		1,64	2,32		3,78			6,14
4,0		1,53	2,08		3,22			5,01
6,0		1,42	1,85		2,70			4,06
8,0		1,34	1,68		2,37			3,45
10,0		1,28	1,55		2,12			3,01

Железо*² [105, 110]. Фактор накопления по керме в воздухе. Учтено излучение. Для E₀=5 ÷ 15 МэВ во второй строке приводятся факторы

0,015	1,00	1,00	1,01	1,01	1,01	1,01	1,01	1,01
0,02	1,01	1,01	1,01	1,02	1,02	1,02	1,02	1,02
0,03	1,02	1,03	1,04	1,04	1,05	1,05	1,06	1,06
0,04	1,04	1,06	1,08	1,09	1,10	1,11	1,12	1,13
0,05	1,07	1,10	1,14	1,16	1,18	1,20	1,22	1,23
0,06	1,11	1,15	1,21	1,25	1,29	1,32	1,34	1,37
0,08	1,19	1,27	1,39	1,49	1,57	1,64	1,70	1,75
0,1	1,26	1,40	1,61	1,78	1,94	2,07	2,20	2,31
0,15	1,40	1,68	2,15	2,59	3,00	3,39	3,77	4,13
0,2	1,47	1,86	2,59	3,33	4,08	4,85	5,64	6,44
0,3	1,51	1,99	3,00	4,12	5,34	6,66	8,08	9,59
0,4	1,50	2,01	3,12	4,40	5,86	7,48	9,27	11,2
0,5	1,48	1,99	3,12	4,40	5,96	7,68	9,58	11,7
0,6	1,46	1,96	3,07	4,39	5,90	7,61	9,51	11,6
0,8	1,43	1,90	2,96	4,20	5,62	7,21	8,96	10,9
1,0	1,41	1,85	2,85	4,00	5,30	6,74	8,31	10,0
1,5	1,37	1,76	2,62	3,59	4,65	5,79	7,01	8,30
2,0	1,35	1,71	2,49	3,34	4,25	5,22	6,25	7,33
3,0	1,32	1,64	2,28	2,96	3,68	4,45	5,25	6,09
4,0	1,30	1,57	2,12	2,68	3,29	3,93	4,60	5,31
5,0	1,32	1,58	2,08	2,60	3,14	3,70	4,31	4,96
	1,27	1,51	1,97	2,46	2,98	3,53	4,11	4,73
6,0	1,31	1,56	2,01	2,48	2,98	3,50	4,05	4,63
	1,25	1,47	1,87	2,30	2,76	3,25	3,78	4,33
8,0	1,29	1,52	1,92	2,31	2,75	3,20	3,65	4,21
	1,22	1,39	1,71	2,04	2,41	2,81	3,24	3,71
10,0	1,28	1,50	1,87	2,26	2,65	3,09	3,54	4,03
	1,19	1,33	1,59	1,86	2,16	2,50	2,87	3,27
15,0	1,26	1,48	1,86	2,27	2,72	3,21	3,73	4,30
	1,14	1,24	1,41	1,59	1,80	2,04	2,31	2,61

Олово [90, 113]. Факторы накопления по керме в воздухе. Для E₀=E₀=0,5 ÷ 10 МэВ — данные [90] без учета вторичных излучений.

0,03	1,91	2,59	6,28	12,4	24,7	50,2	105	220
0,04	2,40	3,14	6,23	10,0	15,7	24,5	38,7	61,8
0,05	2,59	3,23	4,97	6,12	7,14	8,16	9,25	10,5
0,06	2,39	2,71	3,28	3,37	3,37	3,34	3,31	3,28
0,07	2,03	2,12	2,27	2,26	2,23	2,22	2,22	2,22
0,08	1,70	1,72	1,78	1,78	1,79	1,79	1,80	1,81
0,09	1,47	1,48	1,53	1,55	1,56	1,57	1,58	1,59
0,1	1,33	1,35	1,39	1,41	1,43	1,45	1,46	1,47

E ₀ , МэВ	8	10	15	20	25	30	35	40
			11,9	18,7	26,3			
		9,30	12,1	19,5				2,75* ³
		8,65	13,0	17,7				3,0
		6,88	10,1	13,4				4,0
		5,49	7,97	10,4				6,0
		4,58	6,56	8,52				8,0
		3,96	5,63	7,32				10,0

аннигиляционное и тормозное излучение, не учтено флуоресцентное излучение. Для E₀=0,5 ÷ 15 МэВ во второй строке приводятся факторы накопления без учета тормозного излучения.

1,01	1,01	1,01	1,01	1,01	1,01	1,01	1,01	0,015
1,02	1,02	1,03	1,03	1,03	1,03	1,03	1,03	0,02
1,06	1,07	1,07	1,08	1,08	1,09	1,09	1,09	0,03
1,13	1,14	1,16	1,17	1,18	1,19	1,20	1,21	0,04
1,24	1,26	1,30	1,33	1,35	1,37	1,38	1,39	0,05
1,39	1,42	1,49	1,54	1,58	1,62	1,64	1,66	0,06
1,81	1,90	2,08	2,22	2,34	2,45	2,53	2,59	0,08
2,41	2,61	3,01	3,33	3,61	3,86	4,07	4,23	0,1
4,49	5,17	6,75	8,21	9,58	10,9	12,1	13,2	0,15
7,25	8,90	13,2	17,6	22,2	26,9	31,7	36,4	0,2
11,2	14,7	24,7	36,4	49,6	64,3	80,3	97,4	0,3
13,3	18,1	32,6	50,8	72,5	97,7	126	158	0,4
14,0	19,1	35,1	55,4	79,9	108	141	177	0,5
13,9	19,0	34,8	54,8	78,8	107	138	173	0,6
13,0	17,5	31,4	48,5	64,8	91,0	116	144	0,8
11,8	15,8	27,5	41,3	57,0	74,5	93,5	114	1,0
9,65	12,5	20,6	29,7	39,7	50,4	61,8	73,8	1,5
8,45	10,8	17,4	24,6	32,5	40,9	49,8	59,1	2,0
6,96	8,80	13,8	19,4	25,4	31,7	38,4	45,5	3,0
6,05	7,60	11,9	16,8	22,1	27,9	34,0	40,6	4,0
5,62	7,03	11,1	15,7	20,9	26,7	33,1	39,9	5,0
5,38	6,75	10,7	15,2	20,3	25,9	32,0	38,8	
5,24	6,57	10,4	14,9	20,1	26,1	32,4	40,3	6,0
4,92	6,18	9,85	14,2	19,3	25,1	31,5	38,8	
4,74	5,94	9,56	14,2	19,8	26,5	34,6	44,3	8,0
4,20	5,30	8,64	12,9	18,2	24,5	32,0	40,9	
4,57	5,73	9,41	14,5	20,8	29,2	39,6	53,1	10,0
3,71	4,69	7,88	12,3	18,1	25,7	35,3	47,6	
4,93	6,37	11,4	19,1	31,1	49,3	76,3	117	15,0
2,95	3,77	6,80	11,8	20,0	32,8	52,6	82,8	

= 0,03 ÷ 0,5 МэВ — данные [113] с учетом флуоресцентного излучения, для

468	2,13+3 ⁵	9,70+4	4,63+6	2,30+8	1,19+10	6,35+11	3,54+13	0,03
99,9	271	3,91+3	6,78+4	1,31+6	2,72+7	5,82+8	1,28+10	0,04
12,1	16,5	47,5	183	797	3,63+3	1,70+4	8,12+4	0,05
3,26	3,22	3,17	3,14	3,13	3,12	3,12	3,13	0,06
2,22	2,22	2,23	2,25	2,26	2,27	2,29	2,31	0,07
1,81	1,82	1,85	1,87	1,89	1,91	1,93	1,95	0,08
1,60	1,61	1,64	1,67	1,70	1,73	1,76	1,78	0,09
1,48	1,50	1,54	1,58	1,62	1,65	1,69	1,72	0,1

$E_0, \text{МэВ}$	μd							
	0,5	1	2	3	4	5	6	7
0,2	1,15	1,22	1,36	1,47	1,56	1,64	1,71	1,78
0,3	1,23	1,36	1,65	1,89	2,11	2,32	2,51	2,70
0,4	1,28	1,46	1,89	2,28	2,65	3,01	3,36	3,70
0,5	1,31* ⁶	1,52	2,05	2,55	3,05	3,55	4,05	4,54
		1,56* ⁷	2,08		3,09			4,57
1,0		1,64	2,30		3,74			6,17
2,0		1,57	2,17		3,53			5,87
3,0		1,46	1,96		3,13			5,28
4,0		1,38	1,81		2,82			4,82
6,0		1,26	1,57		2,37			4,17
8,0		1,19	1,42		2,05			3,57
10,0		1,14	1,31		1,79			2,99

Вольфрам [90, 113]. Факторы накопления по керме в воздухе. Для $E_0 = 0,5 \div 10 \text{ МэВ}$ — данные [90] без учета вторичных излучений.

0,07	1,79	2,36	5,03	9,37	17,7	34,3	67,9	136
0,08	1,74	2,21	4,08	6,78	11,4	19,6	34,2	60,9
0,09	1,64	2,01	3,22	4,72	6,90	10,2	15,4	23,8
0,10	1,54	1,81	2,56	3,29	4,17	5,29	6,81	8,93
0,12	1,37	1,50	1,75	1,87	1,96	2,03	2,09	2,15
0,14	1,25	1,30	1,39	1,41	1,41	1,42	1,42	1,42
0,16	1,17	1,20	1,25	1,26	1,28	1,29	1,30	1,31
0,18	1,13	1,15	1,19	1,22	1,24	1,25	1,27	1,28
0,2	1,11	1,13	1,18	1,21	1,24	1,26	1,28	1,29
0,3	1,11	1,16	1,25	1,32	1,38	1,44	1,48	1,52
0,4	1,14	1,22	1,37	1,49	1,60	1,69	1,78	1,86
0,5	1,17* ⁶	1,27	1,49	1,66	1,82	1,96	2,09	2,21
		1,28* ⁷	1,50		1,84			2,24
1,0		1,44	1,83		2,57			3,62
2,0		1,42	1,85		2,72			4,09
3,0		1,36	1,74		2,59			4,00
4,0		1,29	1,62		2,41			4,03
6,0		1,20	1,43		2,07			3,60
8,0		1,14	1,32		1,81			3,05
10,0		1,11	1,25		1,64			2,62

Свинец [110, 113]. Факторы накопления по экспозиционной дозе. Учтено строке для $E_0 = 0,4$ и $0,5 \text{ МэВ}$ приведены факторы накопления без учета излучения. Данные для $E_0 = 0,09 \div 0,5 \text{ МэВ}$ — из [113], для $E_0 = 0,4 \div$

0,09	1,71	2,21	4,36	7,74	14,0	26,0	49,4	95,3
0,10	1,64	2,04	3,55	5,72	9,33	15,6	26,6	46,3
0,11	1,55	1,87	2,92	4,23	6,16	9,12	13,8	21,4
0,12	1,47	1,72	2,43	3,18	4,12	5,39	7,19	9,79
0,13	1,40	1,59	2,06	2,46	2,88	3,38	3,99	4,77
0,14	1,34	1,49	1,79	1,99	2,17	2,34	2,52	2,73
0,15	1,29	1,40	1,59	1,70	1,77	1,82	1,86	1,91
0,16	1,25	1,33	1,46	1,51	1,54	1,55	1,56	1,57
0,17	1,22	1,28	1,36	1,39	1,41	1,42	1,42	1,43
0,18	1,19	1,23	1,30	1,32	1,33	1,34	1,35	1,36
0,19	1,17	1,20	1,26	1,28	1,29	1,30	1,31	1,32
0,2	1,15	1,18	1,23	1,25	1,27	1,28	1,29	1,30

$E_0, \text{МэВ}$	8	10	15	20	25	30	35	40
	1,84	1,96	2,24	2,50	2,76	3,01	3,25	3,48
2,88	3,22	4,02	4,78	5,51	6,21	6,88	7,55	0,3
4,04	4,69	6,23	7,69	9,06	10,4	11,6	12,9	0,4
5,04	6,03	8,47	10,8	13,0	15,1	17,0	18,9	0,5
	6,04	8,64						1,0
	8,85	13,7	18,8					2,0
	8,53	13,6	19,3					3,0
	7,91	13,3	20,1					4,0
	7,41	13,2	21,2					6,0
	6,94	14,8	29,1					8,0
	6,19	15,1	34,0					10,0
	5,21	12,5	33,4					

$= 0,07 \div 0,5 \text{ МэВ}$ — данные [113] с учетом флуоресцентного излучения. Для

276	1,15 + 3* ⁵	4,38 + 4	1,80 + 6	7,78 + 7	3,53 + 9	1,66 + 11	8,07 + 11	0,07
110	369	8,73 + 3	2,34 + 5	6,77 + 6	2,06 + 8	6,49 + 9	2,08 + 12	0,08
37,5	97,8	1,34 + 3	2,18 + 4	3,84 + 5	7,02 + 6	1,31 + 8	2,50 + 9	0,09
12,0	23,1	161	1,42 + 3	1,34 + 4	1,30 + 5	1,29 + 6	1,31 + 7	0,10
2,22	2,37	2,93	3,97	5,93	9,84	17,8	34,8	0,12
1,43	1,43	1,45	1,46	1,47	1,49	1,50	1,51	0,14
1,31	1,33	1,36	1,38	1,40	1,42	1,43	1,45	0,16
1,29	1,31	1,35	1,38	1,41	1,43	1,45	1,48	0,18
1,31	1,33	1,38	1,42	1,46	1,49	1,52	1,55	0,2
1,56	1,63	1,77	1,88	1,99	2,09	2,18	2,27	0,3
1,93	2,06	2,34	2,59	2,82	3,03	3,22	3,42	0,4
2,33	2,54	3,02	3,45	3,83	4,19	4,54	4,87	0,5
	2,61	3,12						1,0
	4,64	6,25	7,35* ³					2,0
	5,27	8,07	10,6* ³					3,0
	5,92	9,66	14,1					4,0
	6,27	12,0	20,9					6,0
	6,29	15,7	36,3					8,0
	5,40	15,2	41,9					10,0
	4,65	14,0	39,3					

флуоресцентное, аннигиляционное и тормозное излучение. Во второй флуоресцентного излучения, для $E_0 = 4 \div 15 \text{ МэВ}$ — без учета тормозного 15 МэВ — из [110].

186	722	23400	8,28 + 5	3,11 + 7	1,22 + 9	4,91 + 10	2,04 + 12	0,09
81,8	265	5770	1,42 + 5	3,73 + 6	1,02 + 8	2,89 + 9	8,32 + 10	0,10
33,8	89,3	1240	20100	3,49 + 5	6,27 + 6	1,15 + 8	2,15 + 9	0,11
13,7	28,4	234	2330	24800	2,71 + 5	3,02 + 6	3,43 + 7	0,12
5,82	9,21	39,7	220	1320	8230	52300	3,40 + 5	0,13
2,97	3,62	7,24	18,7	56	181	609	2120	0,14
1,95	2,05	2,36	2,83	3,59	4,87	7,09	11,1	0,15
1,58	1,59	1,61	1,62	1,63	1,64	1,65	1,65	0,16
1,43	1,44	1,45	1,47	1,48	1,50	1,51	1,53	0,17
1,36	1,38	1,40	1,42	1,44	1,46	1,48	1,49	0,18
1,33	1,35	1,38	1,41	1,43	1,45	1,47	1,48	0,19
1,31	1,33	1,37	1,40	1,42	1,45	1,47	1,49	0,2

E_0 , МэВ	μd							
	0,5	1	2	3	4	5	6	7
0,25	1,11	1,13	1,19	1,22	1,25	1,28	1,30	1,32
0,3	1,10	1,13	1,21	1,26	1,30	1,34	1,37	1,40
0,35	1,10	1,15	1,24	1,31	1,37	1,42	1,46	1,50
0,4	1,11* ⁶	1,17	1,29	1,38	1,45	1,51	1,57	1,62
	1,07* ⁸	1,13	1,23	1,31	1,37	1,42	1,47	1,52
0,45	1,13* ⁶	1,19	1,33	1,44	1,53	1,61	1,69	1,75
0,5	1,14* ⁶	1,22	1,38	1,50	1,61	1,71	1,80	1,89
	1,09* ⁸	1,18	1,32	1,44	1,53	1,61	1,69	1,77
0,6	1,12	1,22	1,41	1,57	1,69	1,80	1,90	2,00
0,8	1,14	1,28	1,53	1,74	1,91	2,08	2,24	2,39
1,0	1,16	1,31	1,61	1,87	2,10	2,32	2,52	2,75
2,0	1,21	1,39	1,76	2,12	2,47	2,83	3,20	3,58
3,0	1,23	1,39	1,73	2,09	2,46	2,86	3,29	3,76
4,0	1,25	1,41	1,74	2,11	2,49	2,92	3,40	3,92
	1,20	1,33	1,63	1,96	2,32	2,72	3,17	3,67
5,0	1,25	1,40	1,71	2,06	2,45	2,89	3,39	3,96
	1,18	1,29	1,53	1,82	2,15	2,53	2,97	3,48
6,0	1,26	1,42	1,74	2,10	2,51	2,98	3,52	4,14
	1,17	1,26	1,48	1,73	2,03	2,38	2,80	3,28
8,0	1,27	1,46	1,82	2,26	2,78	3,40	4,15	5,05
	1,15	1,22	1,38	1,58	1,82	2,13	2,49	2,95
10,0	1,29	1,51	1,97	2,54	3,26	4,17	5,32	6,78
	1,13	1,18	1,30	1,46	1,67	1,92	2,25	2,66
15,0	1,32	1,62	2,26	3,16	4,43	6,21	8,69	12,1
	1,11	1,16	1,23	1,33	1,47	1,66	1,92	2,26

Уран [90, 113]. Факторы накопления по керме в воздухе. Для $E_0 =$ для $E_0 = 0,5 \div 10$ МэВ — данные [90] без учета вторичных излучений.

0,12	1,65	2,09	3,84	6,50	11,2	19,8	35,8	65,8
0,13	1,58	1,95	3,25	5,06	7,99	12,9	21,4	36,0
0,14	1,52	1,82	2,78	3,98	5,73	8,41	12,6	19,4
0,15	1,45	1,70	2,41	3,18	4,18	5,57	7,56	10,5
0,16	1,56	1,84	2,57	3,22	3,94	4,79	5,86	7,26
0,17	1,35	1,52	1,89	2,19	2,48	2,79	3,17	3,62
0,18	1,31	1,44	1,71	1,89	2,04	2,18	2,32	2,48
0,19	1,28	1,38	1,58	1,68	1,75	1,81	1,86	1,92
0,20	1,25	1,33	1,47	1,54	1,57	1,60	1,62	1,63
0,22	1,20	1,25	1,34	1,37	1,38	1,39	1,40	1,41
0,24	1,17	1,20	1,26	1,29	1,30	1,32	1,33	1,34
0,26	1,14	1,17	1,22	1,25	1,27	1,29	1,31	1,32
0,28	1,13	1,15	1,21	1,24	1,27	1,29	1,31	1,32
0,3	1,11	1,14	1,20	1,24	1,27	1,29	1,32	1,34
0,4	1,10	1,15	1,23	1,30	1,35	1,39	1,44	1,47
0,5	1,12* ⁶	1,17	1,29	1,39	1,46	1,53	1,59	1,65
		1,17* ⁷	1,30	1,48	1,67	1,87	2,09	2,34
1,0		1,31	1,56	1,98	2,50	3,09	3,78	4,54
2,0		1,33	1,64	2,23	2,83	3,48	4,21	5,00
3,0		1,29	1,58	2,21	2,81	3,45	4,15	4,95
4,0		1,24	1,50	2,09	2,67	3,27	3,94	4,68
6,0		1,16	1,36	1,85	2,36	2,96	3,58	4,26
8,0		1,12	1,27	1,66	2,11	2,61	3,13	3,68
10,0		1,09	1,20	1,51	1,92	2,26	2,71	3,18

E_0 , МэВ	8	10	15	20	25	30	35	40	E_0 , МэВ
	0,25	1,34	1,37	1,43	1,48	1,52	1,56	1,60	
0,3	1,42	1,47	1,56	1,64	1,72	1,78	1,85	1,91	0,3
0,35	1,54	1,60	1,74	1,86	1,96	2,06	2,16	2,25	0,35
0,4	1,67	1,76	1,95	2,11	2,26	2,40	2,53	2,66	0,4
	1,56	1,64	1,79	1,92	2,04	2,15	2,25	2,33	
0,45	1,82	1,93	2,18	2,40	2,60	2,78	2,96	3,14	0,45
0,5	1,96	2,10	2,42	2,69	2,95	3,19	3,41	3,64	0,5
	1,85	1,98	2,27	2,52	2,74	2,94	3,13	3,31	
0,6	2,10	2,28	2,65	2,97	3,24	3,50	3,74	3,97	0,6
0,8	2,54	2,83	3,44	4,00	4,49	4,94	5,35	5,74	0,8
1,0	2,96	3,37	4,30	5,17	6,00	6,80	7,53	8,21	1,0
2,0	3,97	4,76	6,80	8,89	11,0	13,1	15,2	17,3	2,0
3,0	4,25	5,31	8,39	12,0	16,1	20,6	25,4	30,6	3,0
4,0	4,50	5,80	10,1	16,1	24,2	34,6	47,7	63,7	4,0
	4,21	5,46	9,61	15,4	23,2	33,3	46,0	61,5	
5,0	4,61	6,14	11,8	21,0	35,3	57,0	88,9	135	5,0
	4,05	5,44	10,6	19,2	32,6	53,1	83,4	127	
6,0	4,86	6,64	13,7	26,6	49,4	88,3	153	259	6,0
	3,85	5,28	11,1	22,1	42,0	76,4	134	230	
8,0	6,13	8,97	22,4	53,6	124	278	610	1310	8,0
	3,50	4,97	12,3	30,0	71,5	165	372	817	
10,0	8,60	13,8	42,8	128	369	1030	2820	7510	10,0
	3,19	4,66	13,3	39,6	117	339	953	2620	
15,0	16,9	32,8	164	783	3610	16100	70300	300000	15,0
	2,74	4,30	17,3	80,6	380	1760	7910	34800	

$= 0,12 \div 0,5$ МэВ — данные [113] с учетом флуоресцентного излучения,

123	439	1,18+4* ⁵	3,50+5	1,09+7	3,55+8	1,19+10	4,05+11	0,12
61,9	190	3,66+3	7,93+4	1,82+6	4,33+7	1,06+9	2,61+10	0,13
30,5	79,3	1,05+3	1,61+4	2,63+5	4,40+6	7,52+7	1,31+9	0,14
15,0	32,3	283	2,95+3	3,26+4	3,71+5	4,28+6	5,03+7	0,15
9,15	15,4	76,4	492	3,49+3	2,56+4	1,92+5	1,47+6	0,16
4,20	5,90	18,1	71,8	315	1,44+3	6,76+3	3,25+4	0,17
2,66	3,11	5,30	11,1	26,9	71,0	197	568	0,18
1,96	2,07	2,39	2,86	3,59	4,77	6,77	10,2	0,19
1,64	1,67	1,71	1,73	1,76	1,78	1,80	1,82	0,20
1,42	1,43	1,45	1,48	1,50	1,52	1,54	1,56	0,22
1,35	1,37	1,41	1,44	1,47	1,50	1,52	1,55	0,24
1,34	1,36	1,41	1,45	1,48	1,52	1,55	1,58	0,26
1,34	1,37	1,42	1,47	1,51	1,55	1,59	1,63	0,28
1,36	1,39	1,45	1,51	1,56	1,61	1,65	1,70	0,3
1,50	1,56	1,69	1,80	1,91	2,00	2,09	2,18	0,4
1,70	1,80	2,00	2,19	2,36	2,52	2,67	2,82	0,5
	1,85	2,08						
	2,97	3,67						1,0
	3,95	5,36	6,48* ³					2,0
	4,51	6,97	9,88					3,0
	4,66	8,01	12,7					4,0
	4,80	10,8	23,0					6,0
	4,36	11,2	28,0					8,0
	3,78	10,5	28,5					10,0

*¹ Дозовый фактор накопления равен фактору накопления поглощенной энергии переходящей в тормозное излучение, равен также и фактору накопления в

*² В данных таблицы факторы накопления без учета тормозного излучения для выполнен домножением факторов накопления из [100, 105] на отношения факторов накопления без учета тормозного излучения, определенные по [110].

*³ Данное значение или для данной энергии приводимые в строке значения

*⁴ Состав бетона приведен в табл. 5.21.

*⁵ $a \pm b$ читать как $a \cdot 10^{\pm b}$.

*⁶ В строке данные [113].

*⁷ В строке данные [90].

*⁸ В строке данные [110].

9. Для факторов накопления при постоянной толщине среды между источником и детектором справедливо соотношение $B_{\infty} > B_{\frac{1}{2}\infty} > B_{бар} > B_{огр}$, где B_{∞} , $B_{\frac{1}{2}\infty}$, $B_{бар}$, $B_{огр}$ — факторы накопления со-

ответственно для бесконечной, полубесконечной, барьерной и ограниченной геометрией защиты.

10. Фактор накопления убывает с увеличением Z , за исключением области высоких энергий ($E_0 \geq 3$ МэВ) при большой глубине проникновения, где фактор накопления сначала растет, проходит через максимум и затем убывает.

11. Для ограниченных (в поперечном к направлению распространения излучения) источников и (или) защит при удалении точки детектирования от защиты фактор накопления уменьшается.

12. Вклад аннигиляционного излучения в дозу, возрастающий с увеличением E_0 , для $E_0 = 8$ МэВ на глубине 7 д. с. п. в свинце составляет 11, в воде — 4,2 %.

Роль тормозного излучения возрастает с увеличением E_0 и Z . Для $E_0 = 8$ МэВ тормозное излучение увеличивает дозу излучения точечного изотропного источника за пластиной толщиной 10 д. с. п. из свинца в 1,80, из железа — в 1,12, из воды — в 1,02 раза.

Флуоресцентное излучение, роль которого резко уменьшается с возрастанием E_0 , особенно значительно проявляется в тяжелых средах, когда E_0 близка к энергии K -скачка. Например, флуоресцентное излучение на выходе из свинцовой пластины толщиной 10 д. с. п. для $E_0 = 0,1$ МэВ ведет к увеличению дозового фактора накопления в 32 раза. Однако уже для энергии источника 0,5 МэВ и выше флуоресцентным излучением с погрешностью до нескольких процентов (в свинце толщиной 8 д. с. п. с погрешностью до 2 %) можно пренебречь.

Отмеченные закономерности подробно проанализированы в [9]. Факторы накопления для гомогенной среды исследовались в [9, 15, 46, 67, 72, 78, 89—115].

Значения факторов накопления для бесконечной геометрии защиты приведены в табл. 5.13—5.20. В расчетах [90] учитывались только три возможных процесса взаимодействия фотонов с веществом (фотоэффект, комптоновское рассеяние и эффект образования пар) и предполагалось, что фотоэффект и эффект образования пар — это процессы поглощения. Для этой простой и широко используемой модели расчетов* энергетические эквиваленты экспозиционной дозы, поглощенной в воз-

* Эта модель предполагает, что тормозное излучение, образуемое вторичными электронами или позитронами, немедленно поглощается в точке образования.

в воздухе, а если можно пренебречь долей энергии вторичных заряженных частиц, воздухе по керме (для радионуклидных источников $g \approx 0,01$, для $E_0 \leq 10$ МэВ $g \approx 0,04$). воды и железа даны по [105], для бетона — по [100]. Учет тормозного излучения накопления по экспозиционной дозе с учетом тормозного излучения к факторам

факторов накопления получены интерполяцией.

духе дозы и кермы в воздухе для точек внутри среды совпадают по значению [15]. Поэтому рассчитанные в [90] дозовые факторы накопления можно рассматривать как факторы накопления, определенные по керме в воздухе в точках данной среды. Факторы накопления поглощенной энергии [90] можно рассматривать как факторы накопления, рассчитанные по керме, если поправкой g можно пренебречь.

Погрешность приведенных в [90] факторов накопления оценивается авторами равной $\pm(5-15)$ % для тяжелых сред и 25—30 % для легких (табл. 5.13—5.22).

Для интерполяции данных о факторах накопления точечных изотропных источников в бесконечной геометрии и выполнения различных вычислений с использованием факторов накопления точечных изотропных источников предложены следующие аппроксимации факторов накопления [15, 78]:

двухэкспоненциальное представление (формула Гэйлора)

$$B(\mu d) = A_1 \exp(-\alpha_1 \mu d) + (1 - A_1) \exp(-\alpha_2 \mu d); \quad (5.45)$$

трехэкспоненциальное представление

$$B(\mu d) = A_1 \exp(-\alpha_1 \mu d) + A_2 \exp(-\alpha_2 \mu d) + (1 - A_1 - A_2) \exp(-\alpha_3 \mu d); \quad (5.46)$$

формула Бергера

$$B(\mu d) = 1 + a \mu d \exp(b \mu d); \quad (5.47)$$

линейная формула

$$B(\mu d) = 1 + k \mu d; \quad (5.48)$$

квадратичная формула

$$B(\mu d) = 1 + c \mu d + d(\mu d)^2; \quad (5.49)$$

полиномиальная формула Капо

$$B(\mu d) = \sum_{i=0}^3 \beta_i (\mu d)^i. \quad (5.50)$$

Наиболее удобны и широко используются первые три приближения. Формула (5.48) справедлива лишь для небольшой толщины защиты.

Таблица 5.14

Энергетические факторы накопления для точечного изотропного источника
в бесконечной среде (без учета вторичного излучения) [90]

E_0 , МэВ	μd						
	1	2	4	7	10	15	20
Вода							
0,255	3,16	6,94	20,6	61,1	134	358	759
0,5	2,56	5,10	13,5	35,0	68,1	153	283
1,0	2,10	3,58	7,42	15,2	25,1	45,7	73,2
2,0	1,73	2,55	4,40	7,51	10,9	17,1	24,2
3,0	1,58	2,18	3,42	5,35	7,35	10,7	14,3
4,0	1,47	1,95	2,91	4,37	5,85	8,34	10,7
6,0	1,36	1,72	2,40	3,39	4,36	6,28	7,35
8,0	1,30	1,59	2,05	2,91	3,67	4,85	5,94
10,0	1,26	1,51	1,97	2,63	3,26	4,26	5,19
Алюминий							
0,5	2,45	4,43	10,0	22,94	41,7	87,0	152
1,0	2,01	3,29	6,52	12,95	21,0	37,6	58,1
2,0	1,67	2,43	4,21	7,21	10,6	16,6	23,2
3,0	1,53	2,11	3,33	5,31	7,41	11,1	14,9
4,0	1,44	1,88	2,82	4,28	5,81	8,42	11,2
6,0	1,33	1,68	2,37	3,47	4,61	6,61	8,60
8,0	1,27	1,54	2,09	2,95	3,86	5,45	7,04
10,0	1,22	1,45	1,91	2,64	3,42	4,78	6,18
Железо							
0,5	2,02	3,20	6,16	12,1	19,9	36,8	57,7
1,0	1,84	2,84	5,27	9,95	15,8	27,5	41,5
2,0	1,60	2,28	3,82	6,54	9,73	15,6	22,2
3,0	1,48	1,98	3,18	5,17	7,44	11,7	16,5
4,0	1,38	1,80	2,71	4,30	6,14	9,59	13,6
6,0	1,28	1,58	2,27	3,51	4,99	8,03	11,8
8,0	1,21	1,45	1,99	2,99	4,23	6,89	10,3
10,0	1,17	1,36	1,81	2,66	3,78	6,36	9,14
Олово							
0,5	1,56	2,08	3,04	4,54	5,99	8,56	—
1,0	1,61	2,25	3,63	5,96	8,53	13,2	18,1
2,0	1,50	2,04	3,25	5,31	7,66	12,1	17,2
3,0	1,39	1,82	2,74	4,63	6,83	11,4	17,0
4,0	1,31	1,67	2,50	4,12	6,21	10,9	17,3
6,0	1,21	1,46	2,09	3,48	5,59	11,5	22,1
8,0	1,15	1,34	1,83	2,97	4,91	11,3	24,7
10,0	1,11	1,26	1,63	2,54	4,16	10,1	23,9

Продолжение табл. 5.14

E_0 , МэВ	μd						
	1	2	4	7	10	15	20
Вольфрам							
0,5	1,27	1,49	1,83	2,23	2,58	3,09	—
1,0	1,42	1,80	2,51	3,51	4,49	6,05	(7,10)*
2,0	1,39	1,76	2,55	3,79	5,10	7,39	(9,66)
3,0	1,31	1,64	2,38	3,69	5,26	8,47	12,4
4,0	1,24	1,52	2,19	3,53	5,40	10,1	17,4
6,0	1,16	1,35	1,87	3,07	5,15	12,3	27,8
8,0	1,11	1,26	1,65	2,58	4,34	11,3	29,8
10,0	1,09	1,20	1,51	2,25	3,71	10,2	27,3
Свинец							
0,5	1,24	1,41	1,68	1,99	2,26	2,27	(2,71)
1,0	1,35	1,66	2,21	2,95	3,65	4,34	5,25
2,0	1,35	1,68	2,37	3,41	4,49	6,33	8,27
3,0	1,29	1,59	2,25	3,39	4,74	7,46	10,7
4,0	1,23	1,49	2,06	3,20	4,72	8,33	13,7
5,11	1,18	1,38	1,89	3,01	4,71	9,64	19,0
6,0	1,15	1,33	1,79	2,87	4,70	10,91	25,2
8,0	1,11	1,24	1,59	2,48	4,11	10,68	29,5
10,0	1,09	1,19	1,46	2,16	3,49	9,25	27,6
Уран							
0,5	1,17	1,29	1,48	1,67	1,84	2,05	—
1,0	1,30	1,54	1,94	2,45	2,91	3,59	—
2,0	1,30	1,59	2,13	2,92	3,71	5,01	(6,08)
3,0	1,25	1,51	2,07	3,01	4,10	6,26	8,77
4,0	1,21	1,43	1,93	2,88	4,11	6,92	10,9
6,0	1,14	1,30	1,70	2,61	4,08	8,75	18,3
8,0	1,10	1,22	1,53	2,27	3,61	8,69	20,9
10,0	1,08	1,17	1,42	2,02	3,16	8,04	20,8

* Значения в скобках получены авторами работы экстраполяцией.

Таблица 5.15

Факторы накопления кермы в данной среде для точечных изотропных

E ₀ , МэВ	μd							
	0,5	1	2	3	4	5	6	7
Вода [105]. Учтено аннигиляционное излучение, не учтено тормозное								
0,015	1,13	1,19	1,28	1,34	1,40	1,44	1,48	1,51
0,02	1,29	1,45	1,70	1,89	2,05	2,19	2,31	2,43
0,03	1,81	2,43	3,46	4,41	5,32	6,18	7,01	7,81
0,04	2,27	3,58	6,41	9,50	12,8	16,3	19,9	23,8
0,05	2,55	4,51	9,49	15,7	23,2	31,8	41,6	52,6
0,06	2,63	4,94	11,5	20,6	32,4	46,9	64,3	84,8
0,08	2,54	4,93	12,5	24,3	40,8	62,7	90,6	125
0,1	2,36	4,52	11,7	23,5	40,6	64,0	94,8	134
0,15	2,07	3,91	9,36	18,6	32,5	52,0	77,9	111
0,2	1,92	3,42	8,22	15,7	26,4	41,3	61,0	86,2
0,3	1,75	2,84	6,25	11,5	19,0	28,8	41,2	56,5
0,4	1,66	2,60	5,42	9,56	15,1	22,2	30,8	41,1
0,5	1,61	2,45	4,87	8,29	12,7	18,1	24,6	32,2
0,6	1,56	2,34	4,48	7,40	11,1	15,4	20,6	26,4
0,8	1,51	2,18	3,96	6,24	8,96	12,1	15,6	19,6
1,0	1,47	2,08	3,62	5,50	7,66	10,1	12,8	15,7
1,5	1,42	1,93	3,11	4,44	5,90	7,47	9,14	10,9
2,0	1,38	1,83	2,82	3,87	4,99	6,16	7,38	8,66
3,0	1,34	1,71	2,47	3,24	4,01	4,81	5,62	6,45
4,0	1,31	1,63	2,26	2,87	3,48	4,09	4,71	5,33
5,0	1,29	1,57	2,10	2,62	3,12	3,63	4,14	4,64
6,0	1,32	1,55	1,98	2,43	2,87	3,31	3,74	4,16
8,0	1,23	1,44	1,82	2,17	2,52	2,86	3,20	3,53
10,0	1,21	1,38	1,70	2,00	2,29	2,57	2,85	3,13
15,0	1,16	1,29	1,51	1,72	1,93	2,14	2,34	2,53

Бетон¹ [100, 104]. Учтено аннигиляционное излучение, не учтено тормозное

0,015	1,02	1,03	1,04	1,05	1,05	1,06	1,06	1,07
0,02	1,05	1,07	1,09	1,11	1,13	1,14	1,15	1,16
0,03	1,15	1,22	1,31	1,38	1,43	1,47	1,51	1,55
0,04	1,31	1,47	1,72	1,90	2,04	2,17	2,28	2,39
0,05	1,15	1,73	2,40	2,78	3,12	3,43	3,73	4,01
0,06	1,81	2,37	3,25	4,02	4,74	5,43	6,08	6,72
0,08	2,19	3,27	5,30	7,26	9,21	11,2	13,2	15,3
0,1	2,39	3,89	7,06	10,4	14,1	17,9	22,1	26,6
0,15	2,32	4,04	8,29	13,5	19,6	26,7	34,8	44,0
0,2	2,11	3,65	7,69	12,9	19,3	27,0	36,0	46,6
0,3	1,86	3,06	6,32	10,6	16,0	22,5	30,3	39,5
0,4	1,73	2,74	5,46	9,00	13,4	18,7	25,0	32,3
0,5	1,66	2,55	4,89	7,89	11,6	16,0	21,1	27,0
0,6	1,60	2,41	4,48	7,10	10,3	14,0	18,2	23,1
0,8	1,53	2,22	3,94	6,03	8,48	11,3	14,5	18,0
1,0	1,49	2,11	3,59	5,35	7,35	9,61	12,1	14,8
1,5	1,42	1,93	3,08	4,36	5,77	7,28	8,90	10,6
2,0	1,39	1,83	2,80	3,82	4,92	6,07	7,28	8,55
3,0	1,34	1,70	2,44	3,19	3,96	4,76	5,58	6,42
4,0	1,31	1,62	2,22	2,81	3,41	4,03	4,66	5,29
5,0	1,32	1,57	2,05	2,54	3,04	3,55	4,06	4,58

источников в бесконечной среде

E ₀ , МэВ	и флуоресцентное излучения							
	8	10	15	20	25	30	35	40
1,54	1,59	1,69	1,77	1,83	1,88	1,93	1,96	0,015
2,53	2,72	3,13	3,47	3,76	4,03	4,25	4,43	0,02
8,61	10,2	14,1	18,1	22,3	26,7	31,3	35,9	0,03
27,8	36,5	61,6	92,1	128	169	216	269	0,04
64,9	93,3	190	331	525	779	1100	1510	0,05
109	167	390	758	1320	2140	3270	4820	0,06
167	278	754	1650	3160	5560	9190	14500	0,08
183	314	917	2120	4260	7780	13100	20300	0,1
153	268	805	1890	3840	7050	12100	19600	0,15
118	202	582	1310	2580	4640	7890	12800	0,2
75,0	122	318	656	1180	1930	2950	4280	0,3
53,2	83,2	197	377	632	972	1400	1940	0,4
40,8	61,8	137	247	395	582	809	1080	0,5
33,0	48,7	102	176	272	388	525	683	0,6
24,0	33,9	65,6	106	156	213	277	349	0,8
18,9	26,0	47,4	73,5	104	138	175	214	1,0
12,8	16,8	27,9	40,4	54,1	68,8	84,4	101	1,5
9,97	12,7	20,1	28,0	36,4	45,2	54,3	63,6	2,0
7,28	8,98	13,4	17,8	22,4	27,1	31,8	36,5	3,0
5,95	7,20	10,3	13,5	16,6	19,8	23,0	26,1	4,0
5,14	6,14	8,62	11,1	13,5	15,9	18,3	20,7	5,0
4,59	5,43	7,49	9,52	11,5	13,5	15,5	17,9	6,0
3,86	4,51	6,08	7,61	9,10	10,6	12,2	14,1	8,0
3,40	3,94	5,24	6,51	7,75	8,97	10,2	11,3	10,0
2,73	3,11	4,04	4,93	5,81	6,64	7,42	8,09	15,0

и флуоресцентное излучения

1,07	1,08	1,09	1,09	1,10	1,11	1,11	1,11	0,015
1,17	1,18	1,21	1,22	1,24	1,25	1,26	1,27	0,02
1,58	1,63	1,74	1,82	1,89	1,95	1,99	2,02	0,03
2,48	2,66	3,02	3,31	3,57	3,79	3,96	4,08	0,04
4,27	4,77	5,89	6,88	7,80	8,64	9,36	9,93	0,05
7,35	8,59	11,6	14,5	17,4	20,0	22,3	23,9	0,06
17,4	21,9	34,1	47,6	62,4	78,3	95,3	113	0,08
31,5	42,1	74,7	116	165	222	286	358	0,1
54,5	79,1	165	292	463	686	963	1300	0,15
58,8	88,5	199	372	620	958	1400	1940	0,2
50,1	76,2	174	326	543	834	1210	1670	0,3
40,7	60,9	134	243	392	583	820	1100	0,4
33,7	49,6	105	183	286	414	567	747	0,5
28,6	41,3	84,0	142	216	305	408	527	0,6
21,9	30,7	58,5	94,1	137	186	242	303	0,8
17,8	24,3	44,0	67,9	95,5	126	160	197	1,0
12,4	16,3	27,1	39,3	52,6	67,0	82,1	98,0	1,5
9,86	12,6	20,0	28,1	36,7	45,7	55,0	64,6	2,0
7,27	9,02	13,6	18,4	23,3	28,4	33,6	38,8	3,0
5,94	7,24	10,6	14,1	17,6	21,2	24,8	28,5	4,0
5,10	6,16	8,86	11,6	14,4	17,3	20,2	23,9	5,0

E ₀ , МэВ	μd							
	0,5	1	2	3	4	5	6	7
6,0	1,25	1,48	1,92	2,35	2,77	3,20	3,64	4,08
8,0	1,21	1,40	1,74	2,07	2,40	2,73	3,07	3,41
10,0	1,18	1,34	1,61	1,88	2,16	2,43	2,71	2,99
15,0	1,13	1,24	1,42	1,61	1,80	1,99	2,18	2,38

Алюминий²² [99]. Учено аннигиляционное излучение, не учено тормозное

0,03	1,14	1,22	1,33		1,45			1,58
0,04	1,32	1,51	1,77		2,14			2,53
0,06	1,79	2,40	3,43		5,14			7,44
0,08	2,21	3,38	5,66		10,2			17,6
0,1	2,42	3,99	7,46		15,4			30,3
0,2	2,10	3,63	7,76		20,0			49,8
0,4	1,73	2,74	5,47		13,6			33,0
0,5	1,65	2,54	4,90		11,7			27,4
1,0	1,49	2,11	3,60		7,39			14,9
2,0	1,39	1,84	2,80		4,94			8,59
5,0	1,28	1,54	2,04		3,03			4,59
8,0	1,21	1,39	1,72		2,37			3,40
10,0	1,18	1,33	1,59		2,12			2,97

Железо [105]. Учено аннигиляционное излучение, не учено тормозное
Вклад тормозного излучения можно оценить по данным [111]

0,015	1,00	1,00	1,01	1,01	1,01	1,01	1,01	1,01
0,02	1,01	1,01	1,01	1,01	1,02	1,02	1,02	1,02
0,03	1,02	1,03	1,03	1,04	1,05	1,05	1,05	1,06
0,04	1,04	1,06	1,08	1,09	1,10	1,11	1,12	1,12
0,05	1,08	1,10	1,14	1,17	1,19	1,21	1,22	1,23
0,06	1,12	1,17	1,23	1,28	1,31	1,34	1,37	1,39
0,08	1,23	1,34	1,51	1,61	1,70	1,78	1,84	1,91
0,1	1,38	1,45	1,94	2,13	2,31	2,48	2,63	2,77
0,15	1,93	2,46	3,22	3,93	4,60	5,23	5,84	6,42
0,2	2,13	2,94	4,34	5,72	7,14	8,58	10,0	11,5
0,3	2,07	3,08	5,09	7,23	9,58	12,1	14,9	17,9
0,4	1,91	2,86	4,90	7,17	9,75	12,7	15,9	19,4
0,5	1,79	2,66	4,57	6,75	9,25	12,1	15,3	18,8
0,6	1,71	2,50	4,27	6,30	8,65	11,3	14,3	17,7
0,8	1,60	2,28	3,81	5,57	7,60	9,88	12,4	15,2
1,0	1,53	2,14	3,50	5,04	6,79	8,74	10,9	13,2
1,5	1,45	1,95	3,03	4,23	5,54	6,95	8,47	10,1
2,0	1,40	1,84	2,76	3,74	4,80	5,93	7,12	8,37
3,0	1,35	1,70	2,39	3,10	3,86	4,66	5,51	6,39
4,0	1,31	1,59	2,12	2,68	3,27	3,89	4,55	5,23
5,0	1,26	1,49	1,93	2,39	2,86	3,37	3,91	4,47
6,0	1,22	1,42	1,79	2,17	2,57	2,99	3,45	3,93
8,0	1,18	1,33	1,60	1,88	2,17	2,50	2,85	3,22
10,0	1,15	1,27	1,48	1,69	1,93	2,19	2,47	2,78
15,0	1,10	1,18	1,31	1,44	1,59	1,76	1,96	2,17

E ₀ , МэВ	8	10	15	20	25	30	35	40	E ₀ , МэВ
	6,0	4,52	5,42	7,70	10,0	12,4	14,7	16,8	
8,0	3,76	4,45	6,21	8,00	9,83	11,7	13,7	16,0	8,0
10,0	3,28	3,85	5,33	6,86	8,45	10,1	11,7	13,4	10,0
15,0	2,58	3,00	4,08	5,23	6,45	7,71	8,97	10,2	15,0

и флуоресцентное излучения

	1,67	1,79	1,88		2,01		2,11	0,03
	2,84	3,26	3,61		4,17		4,61	0,04
	9,66	13,3	16,9		23,9		30,8	0,06
	26,0	42,1	60,9		105		158	0,08
	49,4	91,3	146		298		507	0,1
	96,6	224	428		1150		2410	0,2
	62,6	138	252		606		1150	0,4
	50,5	107	188		425		767	0,5
	24,4	44,2	68,1		126		196	1,0
	12,7	20,2	28,3		46,2		65,7	2,0
	6,21	9,03	11,9		18,0		24,3	5,0
	4,48	6,36	8,34		12,5		17,0	8,0
	3,86	5,45	7,15		10,8		14,9	10,0

и флуоресцентное излучения.

1,01	1,01	1,01	1,01	1,01	1,01	1,01	1,01	1,01	0,015
1,02	1,02	1,02	1,03	1,03	1,03	1,03	1,03	1,03	0,02
1,06	1,06	1,07	1,08	1,08	1,09	1,09	1,09	1,09	0,03
1,13	1,14	1,16	1,17	1,18	1,19	1,20	1,20	1,20	0,04
1,24	1,26	1,30	1,33	1,35	1,37	1,38	1,39	1,39	0,05
1,41	1,45	1,52	1,57	1,61	1,65	1,67	1,68	1,68	0,06
1,96	2,06	2,26	2,41	2,54	2,65	2,73	2,77	2,77	0,08
2,90	3,13	3,61	4,00	4,34	4,63	4,85	4,98	4,98	0,1
6,98	8,07	10,6	12,9	15,0	16,9	18,6	22,8	22,8	0,15
13,1	16,1	24,2	32,5	41,0	49,8	58,8	68,1	68,1	0,2
21,0	27,8	47,6	70,8	97,2	126	158	192	192	0,3
23,3	31,9	58,6	92,3	133	180	233	292	292	0,4
22,7	31,4	58,8	93,9	136	186	242	305	305	0,5
21,3	29,4	55,0	87,4	127	172	223	280	280	0,6
18,2	24,9	45,3	70,4	99,8	133	170	211	211	0,8
15,7	21,1	37,1	56,2	77,9	102	128	156	156	1,0
11,8	15,3	25,4	36,8	49,2	62,6	76,8	91,6	91,6	1,5
9,67	12,4	20,0	28,5	37,7	47,4	57,7	68,4	68,4	2,0
7,30	9,23	14,5	20,4	26,7	33,3	40,4	47,8	47,8	3,0
5,95	7,46	11,7	16,4	21,6	27,0	32,5	37,9	37,9	4,0
5,07	6,33	9,92	14,1	18,7	23,7	28,9	34,0	34,0	5,0
4,44	5,54	8,72	12,5	16,9	21,7	26,8	32,1	32,1	6,0
3,62	4,50	7,18	10,6	14,8	19,8	25,6	32,4	32,4	8,0
3,12	3,82	6,29	9,59	14,0	19,6	26,7	35,4	35,4	10,0
2,42	2,99	5,06	8,44	13,8	22,2	35,0	54,1	54,1	15,0

МэВ	μd							
	0,5	1	2	3	4	5	6	7
Олово [113, 90]. Для $E_0=0,03 \div 0,5$ МэВ — данные [113] по керме данные [90] для поглощенной дозы в данной среде без учета вторичных излучений								
0,03	1,38	1,73	3,07	5,43	10,1	19,8	40,3	84,1
0,04	1,43	1,69	2,52	3,61	5,23	7,78	11,9	18,5
0,05	1,45	1,64	2,07	2,37	2,64	2,91	3,20	3,54
0,06	1,43	1,53	1,69	1,72	1,72	1,72	1,71	1,70
0,07	1,38	1,42	1,48	1,48	1,48	1,48	1,48	1,48
0,08	1,33	1,35	1,39	1,40	1,40	1,41	1,42	1,42
0,09	1,30	1,31	1,35	1,37	1,38	1,39	1,40	1,41
0,1	1,27	1,30	1,34	1,36	1,38	1,40	1,41	1,42
0,2	1,38	1,48	1,69	1,83	1,95	2,06	2,16	2,25
0,3	1,59	1,80	2,31	2,70	3,05	3,37	3,68	3,96
0,4	1,69	1,99	2,78	3,44	4,07	4,68	5,26	5,83
0,5	1,69 ³	2,04	2,98	3,83	4,67	5,50	6,33	7,15
		2,25 ⁴	3,38		5,51			8,58
1,0		2,12	3,18		5,47			9,31
2,0		1,73	2,54		4,35			7,48
3,0		1,49	2,03		3,30			5,62
4,0		1,34	1,74		2,67			4,47
6,0		1,21	1,45		2,06			3,47
8,0		1,14	1,31		1,74			2,73
10,0		1,11	1,24		1,58			2,38

Вольфрам [113]. Фактор накопления по керме в данной среде.

0,07	1,58	2,03	3,93	7,06	13,1	25,1	49,4	99,1
0,08	1,61	2,00	3,50	5,70	9,45	16,1	28,1	50,0
0,09	1,60	1,95	3,09	4,50	6,56	9,71	14,7	22,7
0,1	1,59	1,88	2,72	3,53	4,52	5,78	7,50	9,93
0,12	1,57	1,77	2,17	2,38	2,52	2,63	2,73	2,83
0,14	1,54	1,65	1,83	1,86	1,87	1,86	1,86	1,86
0,16	1,50	1,56	1,65	1,67	1,67	1,68	1,69	1,70
0,18	1,45	1,49	1,57	1,59	1,61	1,63	1,65	1,66
0,2	1,42	1,46	1,53	1,57	1,60	1,63	1,65	1,67
0,3	1,39	1,47	1,62	1,72	1,80	1,87	1,93	1,99
0,4	1,44	1,56	1,81	2,00	2,15	2,29	2,41	2,52
0,5	1,48	1,65	2,01	2,29	2,53	2,74	2,93	3,11

Свинец [113, 90]. Для $E_0=0,09 \div 0,50$ МэВ — данные [113] по керме в данной
среде [90] для поглощенной дозы в данной среде без учета вторичных излучений

0,09	1,24	1,44	2,08	3,15	5,09	8,77	15,8	29,5
0,10	1,28	1,47	2,06	2,95	4,39	6,85	11,1	18,7
0,12	1,33	1,51	1,97	2,45	3,04	3,82	4,89	6,42
0,14	1,36	1,51	1,82	2,01	2,17	2,32	2,48	2,65
0,16	1,38	1,49	1,67	1,74	1,77	1,78	1,79	1,80
0,18	1,39	1,46	1,57	1,60	1,61	1,61	1,62	1,63
0,2	1,38	1,43	1,52	1,54	1,56	1,57	1,58	1,60
0,3	1,36	1,42	1,53	1,61	1,66	1,71	1,75	1,79
0,4	1,40	1,49	1,68	1,81	1,92	2,01	2,09 [*]	2,16

МэВ	μd							E_0 , МэВ
	8	10	15	20	25	30	35	
в данной среде с учетом флуоресцентного излучения, для $E_0=0,5 \div 10$ МэВ —								
178	806	3,68+4	1,76+6	8,75+7	4,52+9	2,43+11	1,35+13	0,03
29,5	78,8	1,13+3	1,97+4	3,82+5	7,89+6	1,69+8	3,71+9	0,04
3,96	5,14	13,4	49,7	214	973	4,55+3	2,17+4	0,05
1,70	1,69	1,68	1,68	1,68	1,68	1,68	1,69	0,06
1,48	1,49	1,50	1,51	1,52	1,53	1,55	1,56	0,07
1,43	1,44	1,46	1,48	1,50	1,51	1,53	1,55	0,08
1,42	1,43	1,46	1,49	1,52	1,54	1,57	1,59	0,09
1,43	1,45	1,49	1,53	1,57	1,60	1,64	1,67	0,1
2,33	2,48	2,84	3,19	3,52	3,84	4,16	4,47	0,2
4,24	4,77	6,00	7,18	8,30	9,38	10,4	11,5	0,3
6,39	7,46	10,0	12,4	14,7	16,9	19,0	21,0	0,4
7,98	9,61	13,6	17,5	21,1	24,5	27,8	30,9	0,5
	11,6	17,0	22,5					1,0
	13,6	21,3	28,7					2,0
	11,0	17,7	24,1					3,0
	8,43	15,2	20,2					4,0
	6,80	13,2	19,1					6,0
	5,38	10,9	20,8					8,0
	4,38	9,70	20,8					10,0
	3,78	8,81	20,3					

Учтено флуоресцентное излучение

201	840	3,23+4	1,33+6	5,83+7	2,66+9	1,26+11	6,15+12	0,07
90,2	305	7,30+3	1,98+5	5,77+6	1,78+8	5,55+9	1,79+11	0,08
35,8	94,3	1,31+3	2,16+4	3,82+5	7,01+6	1,31+8	2,51+9	0,09
13,4	26,2	187	1,66+3	1,58+4	1,54+5	1,53+6	1,55+7	0,1
2,94	3,19	4,15	5,91	9,28	16,0	29,8	59,1	0,12
1,86	1,86	1,86	1,88	1,89	1,90	1,91	1,93	0,14
1,71	1,72	1,75	1,78	1,80	1,82	1,84	1,86	0,16
1,68	1,70	1,75	1,78	1,81	1,84	1,87	1,89	0,18
1,69	1,72	1,78	1,83	1,87	1,91	1,94	1,98	0,2
2,04	2,12	2,30	2,46	2,59	2,72	2,84	2,96	0,3
2,62	2,80	3,20	3,54	3,86	4,15	4,43	4,70	0,4
3,28	3,60	4,30	4,92	5,48	6,01	6,51	7,00	0,5

среде с учетом флуоресцентного излучения, для $E_0=0,5 \div 10$ МэВ — дан-

56,3	212	6,56+3	2,22+5	8,08+6	3,09+8	1,23+10	5,05+11	0,09
32,1	100	2,04+3	4,80+4	1,23+6	3,32+7	9,29+8	2,66+10	0,10
8,65	17,0	128	1,23+3	1,30+4	1,41+5	1,56+6	1,77+7	0,12
2,84	3,37	6,26	15,4	45,0	144	481	1,66+3	0,14
1,80	1,81	1,83	1,84	1,85	1,86	1,87	1,88	0,16
1,63	1,64	1,67	1,69	1,71	1,73	1,75	1,77	0,18
1,61	1,63	1,67	1,70	1,73	1,76	1,78	1,81	0,2
1,82	1,88	2,00	2,10	2,19	2,28	2,36	2,44	0,3
2,23	2,35	2,61	2,83	3,03	3,22	3,40	3,58	0,4

E_0 , МэВ	μd							
	0,5	1	2	3	4	5	6	7
0,5	1,44* ³	1,57	1,84	2,04	2,21	2,36	2,49	2,60
		1,51* ⁴	1,80		2,19			2,61
1,0		1,76	2,37		3,39			4,74
2,0		1,58	2,10		3,14			4,70
3,0		1,37	1,73		2,50			3,85
4,0		1,24	1,49		2,09			3,25
5,11		1,19	1,39		1,89			2,96
6,0		1,14	1,29		1,70			2,63
8,0		1,10	1,21		1,50			2,21
10,0		1,08	1,16		1,38			1,92

Уран [113]. Факторы накопления по керме в данной среде.

0,12	1,27	1,47	2,11	3,13	4,89	8,06	13,9	24,6
0,14	1,32	1,51	2,06	2,75	3,72	5,19	7,44	11,0
0,16	1,50	1,75	2,38	2,92	3,51	4,18	5,00	6,05
0,18	1,38	1,53	1,84	2,03	2,18	2,32	2,46	2,60
0,2	1,40	1,52	1,73	1,81	1,86	1,88	1,90	1,92
0,3	1,39	1,44	1,53	1,58	1,62	1,65	1,68	1,70
0,4	1,38	1,45	1,60	1,69	1,76	1,82	1,88	1,93
0,5	1,41	1,50	1,70	1,84	1,96	2,06	2,14	2,22

*¹ Состав бетона указан в табл. 5.21.

*² В расчетах энергия отсечки при детектировании принята равной 0,02 МэВ.

*³ В строке данные [113].

*⁴ В строке данные [90].

Значения коэффициентов для формул (5.45) и (5.46) приведены в табл. 5.23—5.25, а коэффициенты для формулы Бергера (5.47) — в табл. 5.26—5.29.

Хорошую аппроксимацию дает формула (5.50).

Значения коэффициентов для формул (5.48) — (5.50) можно заимствовать, например из [15, 78].

В [115] предложено аналитическое представление зависимости дозового фактора накопления точечного изотропного источника (табл. 5.13) от μd в виде полинома

$$\ln B_n^{T,H}(\mu d) = \sum_{i=0}^n A_i [\ln(\mu d)]^i \quad (5.51)$$

								E_0 , МэВ
8	10	15	20	25	30	35	40	
2,72	2,93	3,38	3,78	4,14	4,48	4,81	5,13	0,5
	3,01	3,52						1,0
	6,01	7,78	9,70					2,0
	6,32	9,05	12,0					3,0
	5,43	8,65	12,6					4,0
	4,79	8,46	13,9					5,11
	4,61	9,38	18,5					6,0
	4,20	9,46	21,5					8,0
	3,50	8,60	23,0					10,0
	2,92	7,15	20,4					

Учтено флуоресцентное излучение.

44,7	154	3,90+3	1,10+5	3,34+6	1,06+8	3,50+9	1,19+11	0,12
16,7	41,2	506	7,45+3	1,19+5	1,97+6	3,35+7	5,79+8	0,14
7,43	11,9	53,0	325	2,27+3	1,65+4	1,23+5	9,40+5	0,16
2,76	3,17	5,14	10,3	24,4	63,4	175	501	0,18
1,93	1,95	1,99	2,02	2,04	2,06	2,08	2,11	0,2
1,73	1,77	1,85	1,92	1,98	2,04	2,09	2,15	0,3
1,97	2,05	2,22	2,37	2,50	2,62	2,75	2,87	0,4
2,29	2,42	2,71	2,97	3,20	3,42	3,64	3,85	0,5

и приведены A_0, A_1, A_2, A_3 для воздуха, воды, бетона, алюминия, железа и свинца.

Знание факторов накопления точечных изотропных источников позволяет рассчитывать факторы накопления других протяженных изотропных источников. Например, факторы накопления плоских изотропных источников могут быть рассчитаны по формуле

$$B^n(\mu d) = \{A_1 E_1 [\mu d (1 + \alpha_1)] + (1 - A_1) E_1 [\mu d (1 + \alpha_2)]\} / E_1(\mu d), \quad (5.52)$$

при этом значения коэффициентов A_1, α_1 и α_2 могут быть выбраны из табл. 5.23—5.25.

Таблица 5.16

Дозовые факторы накопления (по экспозиционной дозе) для плоского изотропного и тормозное излучение, не учтено флуоресцентное излучение. Для $E_0 = 4 \div 15$ МэВ во второй строке приведены факторы

E_0 , МэВ	μd							
	0,5	1	2	3	4	5	6	7
Вода								
0,1	4,18	7,79	19,1	37,5	64,6	101	149	213
0,2	3,18	5,62	13,3	26,1	45,4	71,7	107	154
0,3	2,80	4,73	10,5	19,7	33,0	50,3	71,2	101
0,4	2,60	4,24	9,01	16,1	25,8	38,0	52,0	71,8
0,5	2,44	3,89	7,91	13,5	21,0	30,3	42,0	55,6
0,6	2,33	3,64	7,17	11,9	18,1	25,5	34,7	45,2
0,8	2,20	3,32	6,20	9,90	14,3	19,5	25,7	32,5
1,0	2,10	3,10	5,55	8,56	12,0	16,0	20,5	25,5
2,0	1,85	2,54	4,01	5,59	7,24	8,99	10,9	12,8
3,0	1,74	2,29	3,37	4,47	5,58	6,72	7,96	9,19
4,0	1,67	2,14	2,99	3,82	4,63	5,44	6,30	7,14
	1,67	2,13	2,98	3,80	4,61	5,42	6,28	7,11
5,0	1,60	1,99	2,69	3,36	4,01	4,65	5,33	5,99
	1,59	1,98	2,67	3,34	3,99	4,63	5,31	5,96
6,0	1,55	1,89	2,48	3,06	3,60	4,14	4,71	5,25
	1,54	1,88	2,47	3,04	3,58	4,12	4,68	5,22
8,0	1,46	1,73	2,20	2,65	3,07	3,49	3,92	4,34
	1,45	1,72	2,18	2,62	3,04	3,45	3,88	4,29
10,0	1,40	1,62	2,01	2,38	2,73	3,06	3,40	3,74
	1,38	1,60	1,98	2,34	2,68	3,01	3,35	3,68
15,0	1,32	1,48	1,76	2,02	2,27	2,51	2,76	3,00
	1,28	1,43	1,70	1,95	2,19	2,42	2,65	2,88
Бетон								
0,1	2,76	4,17	7,32	10,9	15,0	19,6	24,8	30,5
0,2	2,68	4,21	8,05	13,0	19,1	26,6	35,7	46,3
0,3	2,52	3,90	7,40	12,0	17,6	24,6	33,0	42,8
0,4	2,40	3,67	6,81	10,9	15,8	21,8	29,0	37,3
0,5	2,30	3,46	6,32	9,94	14,3	19,5	25,7	32,7
0,6	2,22	3,30	5,92	9,17	13,1	17,6	23,0	29,0
0,8	2,11	3,07	5,32	8,03	11,2	14,8	18,9	23,5
1,0	2,02	2,89	4,86	7,18	9,81	12,7	16,1	19,7
2,0	1,82	2,44	3,74	5,13	6,59	8,13	9,83	11,6
3,0	1,71	2,21	3,20	4,22	5,26	6,32	7,48	8,64
4,0	1,66	2,09	2,91	3,72	4,51	5,32	6,17	7,02
	1,65	2,09	2,90	3,70	4,49	5,29	6,14	6,98
5,0	1,58	1,96	2,64	3,30	3,96	4,62	5,31	5,99
	1,58	1,95	2,62	3,28	3,93	4,58	5,27	5,95
6,0	1,54	1,87	2,46	3,04	3,61	4,17	4,77	5,35
	1,53	1,86	2,44	3,01	3,57	4,13	4,72	5,29
8,0	1,45	1,71	2,18	2,63	3,07	3,50	3,98	4,41
	1,43	1,68	2,14	2,58	3,01	3,43	3,88	4,32
10,0	1,39	1,61	2,00	2,37	2,74	3,11	3,49	3,87
	1,36	1,57	1,94	2,30	2,66	3,01	3,38	3,74

источника в бесконечной среде [109]. Учтено аннигиляционное в воде и бетоне, $E_0 = 3 \div 15$ МэВ в железе, $E_0 = 1 \div 15$ МэВ в свинце накопления без учета тормозного излучения

E_0 , МэВ	8	10	15	20	25	30	35	40	E_0 , МэВ
	0,1	293	515	1550	3660	7410	13600	23000	
0,2	213	377	1140	2630	5180	9150	14900	22900	0,2
0,3	137	229	615	1280	2290	3690	5540	7860	0,3
0,4	94,0	149	359	683	1130	1710	2430	3290	0,4
0,5	71,4	109	243	434	681	983	1330	1730	0,5
0,6	57,1	85,0	178	306	467	658	877	1120	0,6
0,8	40,0	57,0	110	178	259	351	455	568	0,8
1,0	30,9	42,7	78,0	120	169	223	282	346	1,0
2,0	14,9	19,0	30,2	42,1	54,6	67,6	80,8	94,3	2,0
3,0	10,4	12,9	19,3	25,9	32,6	39,4	46,2	52,9	3,0
4,0	7,97	9,62	13,7	17,7	21,6	25,5	29,3	33,1	4,0
	7,94	9,58	13,6	17,6	21,5	25,4	29,2	32,9	
5,0	6,64	7,92	11,0	14,0	17,0	19,9	22,8	25,6	5,0
	6,60	7,88	10,9	14,0	16,9	19,8	22,7	25,5	
6,0	5,79	6,83	9,37	11,8	14,2	16,5	18,7	20,9	6,0
	5,75	6,79	9,31	11,7	14,1	16,3	18,6	20,8	
8,0	4,75	5,55	7,47	9,31	11,0	12,8	14,4	16,1	8,0
	4,69	5,48	7,37	9,18	10,9	12,6	14,2	15,8	
10,0	4,07	4,71	6,28	7,78	9,23	10,6	12,0	13,4	10,0
	4,00	4,64	6,17	7,64	9,07	10,4	11,8	13,1	
15,0	3,23	3,69	4,78	5,83	6,83	7,80	8,74	9,66	15,0
	3,11	3,54	4,59	5,59	6,55	7,48	8,37	9,24	
0,1	36,7	50,5	93,8	149	217	295	384	482	0,1
0,2	58,6	88,4	199	371	615	942	1360	1870	0,2
0,3	54,1	81,6	182	333	541	810	1140	1540	0,3
0,4	46,7	69,2	148	262	412	600	826	1090	0,4
0,5	40,6	59,0	121	205	311	437	582	745	0,5
0,6	35,7	51,1	101	168	250	347	457	579	0,6
0,8	28,5	39,7	74,4	118	170	229	294	365	0,8
1,0	23,6	32,0	57,0	86,6	120	157	196	237	1,0
2,0	13,4	17,1	27,1	38,0	49,4	61,4	73,5	85,9	2,0
3,0	9,82	12,2	18,5	25,0	31,6	38,4	45,2	52,1	3,0
4,0	7,86	9,55	13,7	18,0	22,2	26,4	30,6	34,7	4,0
	7,82	9,50	13,7	17,9	22,1	26,3	30,4	34,5	
5,0	6,67	8,03	11,4	14,8	18,1	21,5	24,8	28,1	5,0
	6,62	7,97	11,3	14,7	18,0	21,3	24,6	27,9	
6,0	5,93	7,08	9,96	12,8	15,6	18,5	21,3	24,1	6,0
	5,87	7,01	9,85	12,6	15,5	18,3	21,0	23,8	
8,0	4,86	5,76	7,98	10,2	12,4	14,5	16,7	18,9	8,0
	4,76	5,63	7,81	9,98	12,1	14,2	16,5	18,4	
10,0	4,25	5,00	6,91	8,84	10,8	12,7	14,7	16,7	10,0
	4,11	4,84	6,68	8,55	10,4	12,3	14,2	16,1	

E ₀ , МэВ	μd							
	0,5	1	2	3	4	5	6	7
15,0	1,34	1,51	1,80	2,08	2,35	2,62	2,91	3,19
	1,26	1,41	1,66	1,91	2,16	2,40	2,66	2,92

Железо

0,1	1,40	1,61	1,97	2,28	2,56	2,82	3,05	3,28
0,2	1,88	2,48	3,65	4,87	6,11	7,37	8,58	9,86
0,3	2,03	2,80	4,43	6,24	8,22	10,3	12,5	14,8
0,4	2,07	2,89	4,69	6,75	9,06	11,6	14,2	17,0
0,5	2,05	2,86	4,68	6,76	9,12	11,8	14,8	18,0
0,6	2,02	2,82	4,61	6,67	9,00	11,6	14,6	17,8
0,8	1,96	2,72	4,39	6,31	8,47	10,9	13,6	16,5
1,0	1,91	2,62	4,17	5,93	7,87	10,0	12,4	15,0
2,0	1,77	2,32	3,46	4,69	5,98	7,36	8,86	10,4
3,0	1,70	2,19	3,14	4,12	5,13	6,18	7,32	8,48
	1,70	2,18	3,12	4,09	5,09	6,14	7,26	8,41
4,0	1,63	2,05	2,83	3,64	4,47	5,34	6,28	7,23
	1,62	2,03	2,81	3,60	4,43	5,28	6,21	7,15
5,0	1,57	1,93	2,60	3,28	3,99	4,72	5,53	6,35
	1,55	1,90	2,55	3,22	3,91	4,64	5,42	6,23
6,0	1,53	1,85	2,45	3,06	3,69	4,36	5,08	5,83
	1,50	1,80	2,38	2,97	3,58	4,22	4,93	5,65
8,0	1,45	1,71	2,20	2,70	3,22	3,77	4,38	5,01
	1,39	1,62	2,05	2,51	2,99	3,50	4,07	4,66
10,0	1,43	1,66	2,09	2,53	3,00	3,50	4,05	4,63
	1,32	1,51	1,86	2,23	2,63	3,06	3,54	4,06
15,0	1,50	1,74	2,18	2,62	3,09	3,60	4,18	4,80
	1,23	1,35	1,59	1,84	2,12	2,43	2,79	3,19

Свинец

0,4	1,19	1,29	1,44	1,56	1,67	1,78	1,87	1,96
0,5	1,24	1,37	1,57	1,75	1,91	2,07	2,21	2,35
0,6	1,29	1,44	1,70	1,93	2,14	2,34	2,53	2,72
0,8	1,35	1,55	1,89	2,20	2,49	2,76	3,03	3,29
1,0	1,42	1,66	2,08	2,47	2,83	3,18	3,53	3,86
	1,42	1,66	2,08	2,47	2,83	3,17	3,52	3,85
2,0	1,48	1,77	2,30	2,83	3,35	3,87	4,42	4,96
	1,48	1,77	2,29	2,81	3,33	3,85	4,39	4,94
3,0	1,45	1,72	2,23	2,76	3,31	3,88	4,50	5,14
	1,44	1,70	2,20	2,72	3,26	3,83	4,44	5,07
4,0	1,43	1,67	2,13	2,63	3,16	3,73	4,36	5,04
	1,40	1,63	2,07	2,55	3,07	3,62	4,24	4,90
5,0	1,41	1,63	2,05	2,52	3,03	3,60	4,24	4,95
	1,35	1,54	1,93	2,36	2,83	3,36	3,96	4,63
6,0	1,41	1,63	2,04	2,50	3,01	3,58	4,24	4,98
	1,31	1,48	1,82	2,20	2,64	3,13	3,70	4,35
8,0	1,42	1,65	2,08	2,58	3,14	3,79	4,56	5,46
	1,22	1,34	1,60	1,90	2,25	2,67	3,17	3,75
10,0	1,50	1,76	2,29	2,90	3,62	4,49	5,56	6,85
	1,18	1,28	1,48	1,72	2,02	2,38	2,82	3,36
15,0	1,89	2,35	3,37	4,64	6,30	8,53	11,5	15,6
	1,12	1,19	1,32	1,48	1,70	1,98	2,34	2,83

* Состав бетона приведен в табл. 5.22.

								E ₀ , МэВ
8	10	15	20	25	30	35	40	
3,47	4,04	5,49	6,98	8,51	10,0	11,6	13,2	15,0
3,18	3,70	5,04	6,41	7,82	9,26	10,7	12,1	

3,50	3,92	4,91	5,83	6,71	7,56	8,39	9,22	0,1
11,2	13,9	21,0	28,6	36,5	44,6	53,0	61,4	0,2
17,2	22,5	37,6	55,1	74,6	95,6	118	141	0,3
20,1	26,9	47,1	71,7	100	132	167	205	0,4
21,5	29,3	53,2	82,7	117	156	199	245	0,5
21,3	29,1	53,0	82,7	118	157	201	248	0,6
19,7	26,6	47,5	72,8	102	135	171	210	0,8
17,7	23,6	40,6	60,5	82,6	106	132	159	1,0
12,0	15,4	24,7	34,9	45,7	57,1	68,9	80,9	2,0
9,66	12,1	18,7	25,8	33,2	40,9	48,8	56,8	3,0
9,59	12,0	18,5	25,6	32,9	40,6	48,4	56,4	
8,21	10,2	15,7	21,7	28,1	34,7	41,6	48,6	4,0
8,13	10,1	15,5	21,5	27,7	34,3	41,1	48,1	
7,19	8,98	13,8	19,2	25,1	31,4	38,0	45,1	5,0
7,06	8,80	13,5	18,9	24,6	30,8	37,4	44,3	
6,61	8,25	12,8	18,2	24,2	30,8	38,1	46,0	6,0
6,41	8,01	12,5	17,7	23,6	30,1	37,2	44,8	
5,68	7,12	11,3	16,5	22,7	29,9	38,2	47,6	8,0
5,29	6,64	10,6	15,5	21,4	28,3	36,2	45,2	
5,26	6,63	10,8	16,4	23,6	32,7	43,9	57,6	10,0
4,61	5,83	9,65	14,7	21,3	29,7	40,1	52,9	
5,48	7,03	12,3	20,5	33,0	51,7	79,2	119	15,0
3,63	4,66	8,34	14,2	23,5	37,7	59,0	90,7	

2,05	2,20	2,53	2,80	3,04	3,26	3,45	3,63	0,4
2,49	2,73	3,30	3,82	4,31	4,79	5,25	5,71	0,5
2,89	3,23	3,99	4,68	5,34	5,96	6,56	7,15	0,6
3,54	4,02	5,12	6,12	7,07	7,97	8,83	9,66	0,8
4,18	4,80	6,24	7,58	8,85	10,1	11,2	12,4	1,0
4,17	4,79	6,23	7,56	8,83	10,0	11,2	12,3	
5,51	6,62	9,45	12,3	15,3	18,2	21,2	24,2	2,0
5,48	6,58	9,39	12,2	15,1	18,1	21,1	24,0	
5,81	7,22	11,1	15,7	20,8	26,4	32,5	39,0	3,0
5,73	7,12	11,0	15,5	20,5	26,0	32,0	38,5	
5,77	7,37	12,3	18,9	27,4	37,9	50,8	66,4	4,0
5,61	7,17	12,0	18,5	26,7	37,0	49,7	65,0	
5,73	7,55	13,8	23,6	38,3	59,8	90,9	134	5,0
5,37	7,09	13,1	22,4	36,6	57,4	87,6	130	
5,81	7,80	15,2	28,1	49,9	85,8	144	237	6,0
5,08	6,84	13,5	25,3	45,5	78,9	133	221	
6,51	9,16	20,7	45,4	97,4	205	425	869	8,0
4,44	6,21	14,1	31,6	69,5	149	316	658	
8,42	12,6	34,4	92,4	244	639	1640	4200	10,0
4,02	5,81	15,1	40,6	109	291	768	1990	
21,1	38,6	175	788	3480	15100	65000	274000	15,0
3,46	5,43	19,9	82,5	352	1510	6410	26900	

Дозовые факторы накопления (по экспозиционной дозе) для плоского
Учтено аннигиляционное и тормозное излучение, не учтено флуоресцентное
 $E_0 = 1 \div 15$ МэВ для свинца во второй строке приводятся факторы накопления

E_0 , МэВ	μd							
	0,5	1	2	3	4	5	6	7
Вода								
0,1	3,15	4,60	8,20	12,9	19,1	26,9	36,2	47,9
0,2	2,40	3,43	6,05	9,61	14,3	20,3	27,8	37,0
0,3	2,12	2,97	5,04	7,77	11,2	15,6	20,7	27,3
0,4	1,97	2,72	4,51	6,79	9,62	13,0	16,8	21,8
0,5	1,86	2,54	4,13	6,10	8,49	11,3	14,7	18,7
0,6	1,79	2,42	3,85	5,56	7,58	9,94	12,7	15,8
0,8	1,69	2,24	3,48	4,93	6,60	8,52	10,7	13,1
1,0	1,61	2,12	3,23	4,51	5,94	7,55	9,37	11,3
2,0	1,45	1,83	2,62	3,46	4,34	5,26	6,26	7,29
3,0	1,38	1,71	2,36	3,02	3,69	4,38	5,10	5,83
4,0	1,34	1,62	2,15	2,68	3,21	3,75	4,31	4,86
	1,33	1,60	2,14	2,67	3,19	3,72	4,28	4,83
5,0	1,31	1,55	2,02	2,48	2,93	3,86	3,84	4,30
	1,29	1,54	2,00	2,46	2,91	3,35	3,81	4,26
6,0	1,29	1,51	1,93	2,33	2,73	3,12	3,53	3,92
	1,27	1,49	1,90	2,30	2,70	3,09	3,49	3,88
8,0	1,26	1,45	1,79	2,13	2,45	2,77	3,10	3,41
	1,22	1,41	1,75	2,08	2,39	2,71	3,02	3,34
10,0	1,24	1,40	1,70	1,98	2,26	2,52	2,81	3,08
	1,19	1,35	1,64	1,91	2,18	2,44	2,70	2,96
15,0	1,26	1,39	1,62	1,84	2,05	2,25	2,46	2,65
	1,14	1,26	1,47	1,67	1,87	2,06	2,25	2,44
Бетон*								
0,1	2,15	2,74	3,85	4,99	6,16	7,40	8,76	10,2
0,2	2,05	2,72	4,16	5,78	7,60	9,68	12,1	14,7
0,3	1,93	2,56	3,92	5,48	7,28	9,33	11,7	14,4
0,4	1,84	2,43	3,73	5,21	6,90	8,83	11,1	13,6
0,5	1,76	2,32	3,54	4,95	6,55	8,38	10,5	12,8
0,6	1,71	2,24	3,38	4,66	6,09	7,71	9,54	11,5
0,8	1,63	2,11	3,14	4,31	5,61	7,06	8,69	10,5
1,0	1,56	2,01	2,96	4,02	5,17	6,43	7,82	9,30
2,0	1,43	1,79	2,52	3,28	4,08	4,92	5,82	6,75
3,0	1,37	1,68	2,28	2,89	3,51	4,16	4,83	5,52
	1,36	1,66	2,26	2,87	3,49	4,13	4,80	5,48
4,0	1,34	1,60	2,12	2,64	3,16	3,69	4,24	4,79
	1,32	1,59	2,10	2,61	3,13	3,65	4,20	4,75
5,0	1,31	1,55	2,00	2,46	2,91	3,36	3,83	4,30
	1,29	1,52	1,97	2,42	2,87	3,31	3,78	4,24
6,0	1,30	1,51	1,92	2,33	2,73	3,14	3,56	3,98
	1,27	1,48	1,88	2,28	2,68	3,07	3,49	3,90
8,0	1,27	1,45	1,79	2,13	2,46	2,78	3,12	3,46
	1,22	1,39	1,71	2,04	2,35	2,67	3,00	3,33
10,0	1,26	1,42	1,72	2,00	2,28	2,57	2,86	3,15
	1,18	1,33	1,60	1,87	2,14	2,41	2,69	2,97

Таблица 5.17

мононаправленного источника (нормальное падение) в бесконечной среде [109].
излучение. Для $E_0 = 4 \div 15$ МэВ для воды, $E_0 = 3 \div 15$ МэВ для бетона и железа,
без учета тормозного излучения

	E_0 , МэВ							
	8	10	15	20	25	30	35	40
62,0	98,3	252	535	1010	1750	2850	4420	0,1
48,4	78,0	205	436	815	1390	2210	3340	0,2
34,9	54,1	130	254	438	690	1020	1430	0,3
27,3	40,8	89,9	164	265	394	553	741	0,4
23,2	34,0	71,9	126	198	288	395	519	0,5
19,3	27,4	54,1	90,2	135	189	252	324	0,6
15,8	21,9	41,3	66,3	96,8	132	173	218	0,8
13,4	18,1	32,4	49,8	70,0	92,8	117	145	1,0
8,35	10,5	16,4	22,7	29,3	36,2	43,3	50,5	2,0
6,56	8,04	11,8	15,6	19,5	23,5	27,4	31,3	3,0
5,41	6,52	9,32	12,1	14,9	17,8	20,6	23,4	4,0
5,38	6,48	9,27	12,0	14,8	17,7	20,5	23,2	
4,75	5,64	7,84	9,98	12,0	14,1	16,1	18,1	5,0
4,71	5,60	7,78	9,91	12,0	14,0	16,0	18,0	
4,31	5,08	6,96	8,77	10,5	12,2	13,9	15,5	6,0
4,27	5,03	6,89	8,68	10,4	12,1	13,7	15,3	
3,72	4,34	5,82	7,25	8,62	9,96	11,2	12,5	8,0
3,64	4,24	5,70	7,10	8,46	9,77	11,0	12,2	
3,34	3,85	5,09	6,28	7,42	8,53	9,60	10,6	10,0
3,22	3,72	4,93	6,09	7,21	8,29	9,34	10,4	
2,85	3,23	4,14	4,99	5,80	6,58	7,32	8,03	15,0
2,62	2,98	3,84	4,65	5,42	6,15	6,85	7,53	
11,7	14,9	24,3	35,8	49,1	64,3	81,0	99,2	0,1
17,7	24,5	48,0	82,0	128	189	264	357	0,2
17,3	24,2	47,7	81,0	125	181	249	330	0,3
16,3	22,7	44,2	74,1	113	161	220	288	0,4
15,4	21,4	41,0	67,5	101	142	189	242	0,5
13,7	18,7	34,2	54,2	78,7	108	141	177	0,6
12,4	16,7	30,0	46,9	67,0	90,4	117	146	0,8
10,9	14,3	24,3	36,1	49,4	63,9	79,3	95,6	1,0
7,71	9,70	15,1	21,0	27,2	33,8	40,6	47,5	2,0
6,21	7,63	11,3	15,2	19,1	23,2	27,4	31,6	3,0
6,17	7,58	11,2	15,1	19,0	23,1	27,2	31,4	
5,35	6,48	9,37	12,3	15,3	18,3	21,4	24,5	4,0
5,31	6,43	9,30	12,2	15,2	18,2	21,2	24,3	
4,77	5,70	8,06	10,4	12,7	15,1	17,4	19,7	5,0
4,70	5,63	7,96	10,3	12,6	14,9	17,2	19,5	
4,39	5,23	7,32	9,41	11,4	13,5	15,6	17,6	6,0
4,31	5,13	7,19	9,26	11,3	13,3	15,3	17,3	
3,80	4,47	6,16	7,84	9,53	11,2	12,8	14,4	8,0
3,66	4,31	5,95	7,59	9,23	10,8	12,4	14,0	
3,44	4,02	5,50	6,99	8,50	10,0	11,5	13,0	10,0
3,24	3,80	5,22	6,65	8,10	9,55	11,0	12,4	

E_0 , МэВ	μd							
	0,5	1	2	3	4	5	6	7
15,0	1,39 1,14	1,52 1,24	1,75 1,44	1,98 1,63	2,20 1,83	2,43 2,02	2,66 2,23	2,89 2,43
Железо								
0,1	1,26	1,36	1,51	1,64	1,74	1,84	1,91	1,99
0,2	1,53	1,83	2,36	2,86	3,34	3,80	4,22	4,64
0,3	1,60	1,99	2,73	3,48	4,25	5,03	5,78	6,57
0,4	1,61	2,03	2,87	3,75	4,68	5,66	6,63	7,68
0,5	1,59	2,02	2,88	3,82	4,82	5,91	7,11	8,38
0,6	1,57	2,00	2,85	3,76	4,74	5,87	7,07	8,35
0,8	1,53	1,93	2,77	3,68	4,66	5,72	6,89	8,14
1,0	1,49	1,88	2,68	3,54	4,46	5,44	6,51	7,63
2,0	1,40	1,73	2,39	3,09	3,82	4,58	5,40	6,24
3,0	1,37	1,66	2,23	2,82	3,43	4,07	4,75	5,46
	1,35	1,63	2,19	2,77	3,38	4,01	4,69	5,39
4,0	1,35	1,60	2,09	2,61	3,14	3,69	4,28	4,88
	1,32	1,56	2,05	2,55	3,07	3,61	4,19	4,79
5,0	1,34	1,57	2,01	2,46	2,93	3,42	3,94	4,47
	1,28	1,50	1,92	2,36	2,82	3,29	3,80	4,32
6,0	1,35	1,55	1,96	2,37	2,80	3,25	3,73	4,23
	1,26	1,45	1,83	2,22	2,62	3,06	3,52	4,01
8,0	1,36	1,54	1,89	2,24	2,60	2,99	3,41	3,85
	1,20	1,35	1,64	1,95	2,28	2,63	3,01	3,41
10,0	1,41	1,57	1,89	2,21	2,55	2,91	3,30	3,71
	1,17	1,29	1,53	1,79	2,06	2,35	2,68	3,02
15,0	1,96	2,13	2,46	2,80	3,17	3,56	3,99	4,45
	1,12	1,21	1,37	1,55	1,74	1,96	2,20	2,46
Свинец								
0,4	1,11	1,17	1,26	1,33	1,39	1,44	1,49	1,53
0,5	1,14	1,22	1,35	1,46	1,55	1,63	1,70	1,77
0,6	1,16	1,27	1,43	1,57	1,68	1,79	1,89	1,98
0,8	1,20	1,33	1,55	1,75	1,92	2,08	2,23	2,37
1,0	1,21	1,37	1,64	1,87	2,09	2,29	2,48	2,67
	1,21	1,37	1,63	1,87	2,08	2,28	2,48	2,66
2,0	1,25	1,44	1,79	2,13	2,47	2,80	3,14	3,48
	1,24	1,43	1,78	2,11	2,45	2,77	3,11	3,45
3,0	1,26	1,44	1,78	2,12	2,47	2,84	3,23	3,63
	1,23	1,40	1,73	2,06	2,41	2,77	3,15	3,54
4,0	1,27	1,43	1,74	2,07	2,41	2,77	3,16	3,58
	1,21	1,36	1,65	1,96	2,29	2,64	3,02	3,42
5,0	1,33	1,48	1,77	2,08	2,41	2,78	3,18	3,61
	1,19	1,31	1,57	1,84	2,14	2,47	2,84	3,24
6,0	1,39	1,54	1,83	2,14	2,48	2,85	3,26	3,72
	1,17	1,28	1,50	1,75	2,02	2,32	2,66	3,04
8,0	1,53	1,69	2,01	2,35	2,74	3,19	3,69	4,27
	1,12	1,20	1,36	1,55	1,77	2,02	2,31	2,65
10,0	1,70	1,88	2,26	2,69	3,20	3,79	4,49	5,32
	1,10	1,16	1,29	1,45	1,62	1,83	2,08	2,38
15,0	3,18	3,47	4,15	5,00	6,10	7,55	9,43	11,9
	1,07	1,11	1,20	1,30	1,42	1,58	1,78	2,03

* Состав бетона приведен в табл. 5.22.

								E_0 , МэВ
8	10	15	20	25	30	35	40	
3,12 2,63	3,58 3,05	4,75 4,10	5,94 5,17	7,14 6,26	8,36 7,36	9,57 8,47	10,7 9,57	15,0
2,06	2,19	2,48	2,74	2,97	3,18	3,38	3,58	0,1
5,06	5,90	8,01	10,1	12,3	14,5	16,7	19,0	0,2
7,38	9,07	13,6	18,6	23,9	29,7	35,7	42,0	0,3
8,77	11,1	17,9	25,7	34,7	44,7	55,6	67,4	0,4
9,74	12,7	21,5	32,3	44,9	59,1	74,8	91,8	0,5
9,71	12,6	21,5	32,4	45,2	60,0	76,7	95,1	0,6
9,47	12,4	21,0	31,4	43,5	57,3	72,6	89,2	0,8
8,82	11,3	18,5	26,8	35,8	45,6	55,9	66,6	1,0
7,12	8,95	13,9	19,4	25,4	31,6	38,1	44,9	2,0
6,18	7,69	11,7	16,2	21,0	26,0	31,3	36,8	3,0
6,10	7,59	11,6	16,0	20,8	25,8	31,0	36,4	
5,51	6,81	10,3	14,2	18,5	23,0	27,7	32,7	4,0
5,41	6,69	10,2	14,0	18,2	22,7	27,4	32,2	
5,02	6,18	9,34	12,8	16,6	20,7	25,0	29,5	5,0
4,86	5,99	9,08	12,5	16,2	20,2	24,4	28,8	
4,75	5,86	8,96	12,5	16,5	20,9	25,7	30,8	6,0
4,51	5,58	8,58	12,0	15,9	20,2	24,8	29,8	
4,31	5,29	8,18	11,6	15,8	20,6	26,0	32,1	8,0
3,83	4,74	7,42	10,7	14,6	19,1	24,3	30,1	
4,14	5,08	7,96	11,6	16,3	22,0	28,9	37,2	10,0
3,39	4,20	6,72	10,0	14,2	19,4	25,8	33,4	
4,95	6,06	9,75	15,1	22,8	33,8	49,3	70,7	15,0
2,76	3,43	5,78	9,40	14,8	22,7	34,1	50,3	
1,57	1,64	1,78	1,89	1,99	2,08	2,16	2,24	0,4
1,83	1,94	2,17	2,37	2,56	2,73	2,89	3,05	0,5
2,06	2,21	2,54	2,82	3,07	3,31	3,53	3,74	0,6
2,51	2,76	3,33	3,84	4,30	4,72	5,12	5,49	0,8
2,84	3,18	3,93	4,61	5,23	5,83	6,39	6,93	1,0
2,83	3,17	3,92	4,59	5,22	5,81	6,37	6,91	
3,81	4,49	6,18	7,89	9,62	11,3	13,1	14,8	2,0
3,78	4,45	6,13	7,83	9,54	11,2	13,0	14,7	
4,04	4,90	7,28	9,99	13,0	16,3	19,9	23,7	3,0
3,94	4,79	7,14	9,80	12,7	16,0	19,5	23,3	
4,02	4,98	7,88	11,5	16,1	21,7	28,5	36,4	4,0
3,84	4,77	7,59	11,1	15,6	21,1	27,7	35,5	
4,08	5,15	8,64	13,6	20,7	30,6	44,0	62,1	5,0
3,67	4,66	7,94	12,7	19,5	28,9	41,8	59,3	
4,22	5,38	9,46	15,9	25,9	41,3	64,6	99,4	6,0
3,46	4,45	8,00	13,7	22,8	36,8	58,3	90,6	
4,92	6,51	12,8	24,9	47,6	90,3	169	317	8,0
3,03	3,98	7,87	15,5	30,3	58,8	112	215	
6,30	8,85	20,7	48,5	113	266	619	1430	10,0
2,73	3,62	7,78	17,5	40,4	94,3	220	516	
15,1	25,1	95,1	373	1470	5780	22500	87100	15,0
2,34	3,25	8,98	29,5	105	387	1440	5410	

Таблица 5.18

Энергетические факторы накопления для плоского мононаправленного источника (нормальное падение излучения) в бесконечной среде (без учета вторичных излучений) [90]

E_0 , МэВ	μd					
	1	2	4	7	10	15
Вода						
0,5	2,75	4,49	9,11	20,2	34,5	70,6
1,0	2,21	3,28	5,89	10,7	16,6	28,3
2,0	1,73	2,42	3,87	6,08	8,74	12,8
3,0	1,58	2,09	3,16	4,79	6,44	9,23
4,0	1,47	1,91	2,74	4,00	5,28	7,24
6,0	1,36	1,69	2,33	3,26	4,17	5,74
8,0	1,29	1,56	2,07	2,78	3,49	4,71
Железо						
0,5	2,09	2,96	4,91	8,39	12,5	20,9
1,0	1,89	2,68	4,45	7,57	11,2	18,2
2,0	1,61	2,20	3,44	5,51	7,85	12,2
3,0	1,49	1,93	2,95	4,59	6,38	9,67
4,0	1,39	1,78	2,60	3,96	5,47	8,27
6,0	1,28	1,57	2,19	3,25	4,47	6,87
8,0	1,22	1,45	1,93	2,80	3,82	5,94
10,0	1,17	1,36	1,77	2,51	3,44	5,48
Олово						
0,5	(1,70)*	(2,02)	(2,75)	(3,71)	(4,68)	(6,43)
1,0	1,63	2,19	3,30	5,01	6,80	10,1
2,0	1,52	2,01	3,03	4,66	6,45	9,73
4,0	1,33	1,66	2,40	3,73	5,35	8,83
6,0	1,22	1,46	2,02	3,16	4,76	8,74
10,0	1,13	1,27	1,61	2,40	3,68	7,39
Свинец						
0,5	1,24	1,39	1,61	1,84	2,04	—
1,0	1,37	1,65	2,12	2,71	3,28	4,17
2,0	1,36	1,68	2,28	3,14	4,03	5,48
3,0	1,31	1,61	2,23	3,21	4,31	6,33
4,0	1,24	1,45	1,99	2,95	4,09	6,70
6,0	1,15	1,32	1,73	2,60	3,98	7,78
8,0	1,12	1,22	1,53	2,23	3,39	6,88
10,0	1,09	1,17	1,40	1,93	2,81	5,60
Уран						
0,5	1,17	1,28	1,44	1,60	1,73	—
1,0	1,29	1,51	1,87	2,28	2,65	3,52
2,0	1,30	1,57	2,06	2,73	3,38	4,60
3,0	1,26	1,50	2,01	2,80	3,67	5,38
4,0	1,21	1,43	1,87	2,67	3,62	5,66
6,0	1,14	1,30	1,67	2,41	3,51	6,41
8,0	1,11	1,22	1,50	2,12	3,10	5,92
10,0	1,08	1,18	1,40	1,90	2,74	5,26

* Значения в скобках получены авторами работы [90] экстраполяцией.

Таблица 5.19

Дозовые факторы накопления для плоского косинусоидального источника в бесконечной среде (расчет по формуле (5.53) с использованием факторов накопления из [90] без учета вторичных излучений)

E_0 , МэВ	μd					
	1	2	4	7	10	15
Вода						
1,0	2,74	4,36	7,90	14,3	22,6	41,3
2,0	2,12	3,13	5,01	8,00	11,3	17,3
3,0	1,89	2,65	4,04	6,10	8,21	11,8
4,0	1,75	2,38	3,51	5,12	6,75	9,47
6,0	1,57	2,06	2,88	4,06	5,20	7,20
8,0	1,45	1,83	2,46	3,35	4,20	5,69
Железо						
0,5	2,37	3,56	6,09	10,6	16,4	29,3
1,0	2,22	3,32	5,56	9,48	14,2	24,3
2,0	1,89	2,70	4,30	6,88	9,84	15,8
3,0	1,78	2,47	3,83	6,00	8,44	13,2
4,0	1,61	2,14	3,24	4,97	6,93	10,8
6,0	1,46	1,89	2,74	4,17	5,83	9,29
8,0	1,34	1,66	2,33	3,46	4,84	7,83
10,0	1,27	1,53	2,09	3,11	4,42	7,49
Олово						
1,0	1,89	2,66	4,06	6,19	8,57	13,1
2,0	1,80	2,50	3,81	5,83	8,05	12,5
4,0	1,56	2,11	3,19	5,12	7,55	—
6,0	1,36	1,73	2,56	4,27	6,79	13,8
10,0	1,20	1,42	1,95	3,23	5,44	12,8
Свинец						
0,5	1,28	1,44	1,70	1,96	2,20	—
1,0	1,44	1,77	2,30	2,97	3,60	4,60
2,0	1,46	1,85	2,55	3,60	4,74	6,85
3,0	1,42	1,79	2,54	3,78	5,27	8,48
4,0	1,34	1,66	2,35	3,63	5,36	9,64
6,0	1,24	1,49	2,08	3,43	5,64	12,7
8,0	1,18	1,38	1,87	3,11	5,34	13,4
10,0	1,13	1,28	1,66	2,65	4,51	11,6

Таблица 5.20

Энергетические факторы накопления для плоского косинусоидального источника в бесконечной среде (расчет по формуле (5.53) с использованием факторов накопления из [90] без учета вторичных излучений)

E_0 , МэВ	μd					
	1	2	4	7	10	15
Вода						
1,0	2,63	4,12	7,35	13,2	20,7	37,2
2,0	2,00	2,89	4,56	7,10	9,97	15,0
3,0	1,78	2,44	3,67	5,46	7,28	10,6
4,0	1,62	2,14	3,06	4,38	5,69	8,20
Железо						
0,5	2,44	3,70	6,31	10,9	16,6	29,3
1,0	2,17	3,22	5,37	9,12	13,6	23,1
2,0	1,79	2,51	3,93	6,30	9,02	14,5
3,0	1,65	2,22	3,38	5,24	7,32	11,4
4,0	1,51	1,97	2,88	4,34	6,01	9,28
6,0	1,38	1,73	2,43	3,59	4,94	7,73
8,0	1,28	1,55	2,10	3,05	4,19	6,66
10,0	1,22	1,44	1,89	2,70	3,73	6,11
Свинец						
0,5	1,26	1,42	1,67	1,97	2,16	—
1,0	1,42	1,73	2,23	2,87	3,47	4,42
2,0	1,45	1,82	2,46	3,38	4,32	5,96
3,0	1,40	1,74	2,41	3,45	4,64	7,00
4,0	1,32	1,60	2,20	3,27	4,61	7,82
6,0	1,19	1,40	1,89	2,98	4,75	10,4
8,0	1,14	1,27	1,64	2,52	4,10	9,77
10,0	1,11	1,21	1,49	2,19	3,49	8,39

Таблица 5.21

Состав бетона NBS (эффективный атомный номер равен 13,4) [100]

Элемент	Массовая доля	Парциальная плотность, г/см ³	Элемент	Массовая доля	Парциальная плотность, г/см ³
Водород	0,0056	0,013	Сера	0,0012	0,003
Кислород	0,4983	1,171	Калий	0,0192	0,045
Натрий	0,0171	0,040	Кальций	0,0826	0,194
Магний	0,0024	0,006	Железо	0,0122	0,029
Алюминий	0,0456	0,107	Сумма	1,000	* 2,35
Кремний	0,3158	0,742			

Таблица 5.22

Атомный состав обычного бетона [109]

Элемент	Атомная плотность, 10 ²² атом/см ³	Элемент	Атомная плотность, 10 ²² атом/см ³
H	1,374—02*	Al	1,852—03
C	1,154—04	Si	1,661—02
O	4,592—02	Ca	1,952—03
Na	9,641—04	Fe	3,451—04

* Читать как $1,374 \cdot 10^{-2}$.

Таблица 5.23

Константы A_i и α_i для представления дозовых факторов накопления точечных изотропных источников в бесконечных средах в экспоненциальной форме

$$B_d = A_1 \exp(-\alpha_1 \mu d) + (1 - A_1) \exp(-\alpha_2 \mu d)$$

или

$$B_d = A_1 \exp(-\alpha_1 \mu d) + A_2 \exp(-\alpha_2 \mu d) + (1 - A_1 - A_2) \exp(-\alpha_3 \mu d).$$

Вода [107] (аппроксимированы данные из табл. 5.13 [105] факторов накопления с учетом аннигиляционного излучения, без учета тормозного и флуоресцентного излучения для $\mu d = 0 \div 40$ и $E_0 = 0,015 \div 15$ МэВ)

E_0 , МэВ	Двухэкспоненциальное представление			
	A_1	$-\alpha_1$	α_2	$\delta_{\text{макс}}^* \%$
0,015	1,531+0	6,492-3	2,684-1	2,3
0,02	2,522+0	1,464-2	2,141-1	3,9
0,03	8,465+0	3,735-2	1,157-1	3,7
0,04	9,844+2	2,502-2	-2,242-2	5,3
0,05	1,333+3	5,758-2	-5,432-2	17,2
0,06	6,737+3	8,004-2	-7,921-2	27,4
0,08	6,192+3	1,057-1	-1,048-1	46,2
0,1	8,503+3	1,159-1	-1,153-1	53,2
0,15	4,307+3	1,221-1	-1,210-1	46,5
0,2	3,413+3	1,152-1	-1,141-1	46,7
0,3	2,235+3	9,476-2	-9,335-2	39,9
0,4	4,370+3	7,786-2	-7,786-2	36,1
0,5	2,637+3	6,650-2	-6,570-2	36,7
0,6	3,271+3	5,701-2	-5,639-2	29,3
0,8	2,775+3	4,392-2	-4,330-2	22,4
1,0	5,970+2	3,603-2	-3,354-2	17,8
1,5	8,566+2	2,158-2	-2,027-2	12,3
2,0	1,225+3	1,358-2	-1,280-2	7,1
3,0	2,326+2	6,401-3	-3,204-3	2,0
4,0	1,028+2	3,328-3	2,682-3	0,4
5,0	1,340+1	1,522-2	2,626-2	1,1
6,0	1,577+1	9,266-3	2,202-2	2,0
8,0	6,039+0	2,146-2	5,267-2	1,8
10,0	5,060+0	2,128-2	5,569-2	1,9
15,0	4,684+0	1,545-2	4,444-2	2,0

Продолжение табл. 5.23

E ₀ , МэВ	Трехэкспоненциальное представление					
	A ₁	-A ₂	-α ₁	α ₂	α ₃	δ _{макс.} [*] , %
0,015	1,258 +1	3,984 -1	2,509 -2	3,955 -1	-2,659 -2	1,2
0,02	4,960 +0	6,395 -1	1,058 -3	5,505 -1	3,524 -2	0,4
0,03	1,039 +1	6,924 -1	3,174 -2	9,030 -1	6,484 -2	0,5
0,04	1,183 +2	1,462 +2	2,852 -2	6,613 -3	6,739 -2	0,7
0,05	5,106 +2	6,189 +2	4,231 -2	-1,852 -2	6,537 -2	1,1
0,06	1,641 +3	2,712 +3	4,888 -2	-2,589 -2	6,546 -3	0,9
0,08	1,477 +3	2,543 +3	7,302 -2	-4,109 -2	1,458 -3	4,6
0,1	1,503 +3	2,736 +3	8,190 -2	-4,753 -2	-6,323 -3	9,3
0,15	1,242 +3	2,317 +3	8,536 -2	-5,025 -2	-9,997 -3	8,7
0,2	1,206 +3	2,149 +3	7,780 -2	-4,773 -2	-9,998 -3	5,5
0,3	1,251 +3	1,756 +3	5,541 -2	-3,475 -2	1,528 -2	6,6
0,4	1,182 +3	2,019 +3	3,850 -2	-1,678 -2	1,292 -2	3,7
0,5	1,232 +3	1,664 +3	2,843 -2	-1,351 -2	2,686 -2	2,0
0,6	4,316 +3	4,588 +3	1,751 -2	-1,406 -2	3,682 -2	2,4
0,8	1,102 +3	1,308 +3	1,141 -2	-2,141 -3	4,240 -2	1,0
1,0	1,128 +3	1,174 +3	1,031 -2	-5,925 -3	7,813 -2	2,4
1,5	2,941 +2	2,179 +2	4,964 -2	-3,988 -2	-6,392 -2	8,1
2,0	4,159 +2	2,687 +2	3,784 -2	-2,974 -2	-4,663 -2	4,6
3,0	1,162 +2	6,740 +1	2,395 -2	-7,309 -3	3,262 -2	1,1
4,0	1,928 +1	1,417 +1	2,575 -2	2,054 -2	-4,182 -2	0,4
5,0	1,251 +1	6,071 +0	4,129 -2	5,030 -2	-5,231 -2	1,1
6,0	1,047 +1	3,919 +0	5,176 -2	7,394 -2	-6,205 -2	1,2
8,0	1,011 +1	3,046 +0	4,734 -2	8,321 -2	-5,452 -2	1,5
10,0	8,889 +0	2,360 +0	4,839 -2	9,146 -2	-5,524 -2	1,7
15,0	6,661 +0	1,496 +0	5,032 -2	1,018 -1	-5,774 -2	1,3

Бетон [101] (аппроксимированы данные табл. 5.13 [100] факторов накопления с учетом аннигиляционного излучения, без учета тормозного и флуоресцентного излучения)

E ₀ , МэВ	A ₁	-α ₁	α ₂	δ [*] , %
μd = 0 ÷ 40				
0,015	0,9255	0,00399	0,01695	+1,22 - 4,99
0,02	1,2440	0,00102	0,09200	+1,55 - 4,42
0,03	1,5951	0,00488	0,32336	+3,16 - 4,98
0,04	2,2804	0,01543	0,36934	+6,14 - 5,11
0,05	3,9233	0,02303	0,21256	+4,48 - 5,66

Продолжение табл. 5.23

E ₀ , МэВ	A ₁	-α ₁	α ₂	δ [*] , %
0,06	5,0833	0,04230	0,23264	+5,76 - 7,32
0,08	18,7080	0,03768	0,04497	+4,40 - 4,91
0,1	39,1549	0,04819	0,00151	+9,64 - 5,03
0,15	175,7968	0,06063	-0,04698	+26,97 - 6,02
0,2	142,3797	0,07402	-0,05642	+37,22 - 6,10
0,3	129,0785	0,07579	-0,05671	+46,42 - 4,27
0,4	135,8676	0,06865	-0,05205	+45,57 - 5,09
0,5	104,0646	0,06391	-0,04423	+41,28 - 5,66
0,6	101,6332	0,05752	-0,03888	+38,89 - 4,81
0,8	110,2822	0,04654	-0,03200	+31,08 - 4,95
1,0	101,4567	0,03845	-0,02457	+25,12 - 4,90
1,5	32,8117	0,03522	-0,00174	+14,96 - 4,98
2,0	39,3072	0,02468	-0,00162	+8,47 - 5,02
3,0	13,7579	0,02849	0,02761	+4,91 - 4,08
4,0	14,2241	0,02223	0,02316	+3,64 - 0,24
5,0	9,2680	0,02666	0,03280	+2,14 - 0,91
6,0	8,8694	0,02358	0,03132	+0,17 - 2,58
8,0	7,0033	0,02304	0,03323	-1,09 - 3,59
10,0	5,3187	0,02652	0,03799	+0,11 - 3,41
15,0	4,7588	0,02340	0,02849	+1,32 - 3,55
μd ≤ 20				
0,1	139,5813	0,04127	-0,02927	0,99 - 1,61
0,15	97,7220	0,08301	-0,06400	8,72 - 4,67
0,2	87,8408	0,10004	-0,07912	13,69 - 4,64
0,3	80,5000	0,10500	-0,08400	16,89 - 4,79
0,4	46,6038	0,10489	-0,07132	17,39 - 5,07
0,5	67,3716	0,09198	-0,07061	16,07 - 5,09
0,6	70,0000	0,08400	-0,06500	14,68 - 5,74
0,8	65,7882	0,07061	-0,05247	12,77 - 5,21
1,0	77,7911	0,05818	-0,04420	10,61 - 4,76
1,5	15,1893	0,06012	0,00252	6,86 - 4,98
2,0	17,1222	0,04488	0,00448	4,96 - 2,54

Разные среды [46] (аппроксимация факторов накопления [90] без учета вторичных излучений)

E ₀ , МэВ	A ₁	-α ₁	α ₂	δ [*] , %
Алюминий				
1,0	8,0	0,11	0,044	8 ^{*3}
2,0	5,5	0,082	0,093	—
3,0	4,5	0,074	0,116	4
4,0	3,8	0,066	0,130	—
6,0	3,1	0,064	0,152	—

Продолжение табл. 5.23

E_0 , МэВ	A_1	$-\alpha_1$	α_2	δ_{\max}^* , %
8,0	2,3	0,062	0,150	—
10,0	2,25	0,060	0,128	—
Железо				
0,5	10,0	0,0948	0,012	6,8
1,0	8,0	0,0895	0,04	8,0
2,0	5,5	0,0788	0,07	5,9
3,0	5,0	0,074	0,075	—
4,0	3,75	0,075	0,082	6,25
6,0	2,9	0,0825	0,075	4,95
8,0	2,35	0,0833	0,0546	2,8
10,0	2,0	0,095	0,0116	1,85
Олово				
1,0	4,5	0,080	0,130	2 ³
2,0	4,0	0,080	0,142	—
3,0	3,3	0,092	0,130	—
4,0	2,8	0,110	0,110	5
6,0	1,7	0,144	0,040	—
8,0	1,2	0,170	0,00	3
10,0	0,82	0,185	0,100	0
Вольфрам				
1,0	3,3	0,043	0,148	0
2,0	2,9	0,069	0,188	4 ³
3,0	2,7	0,086	0,134	0
4,0	2,05	0,118	0,070	—
6,0	1,2	0,171	0,000	0
8,0	0,7	0,205	0,052	4
10,0	0,6	0,212	0,144	6
Свинец				
0,5	1,65	0,032	0,296	-1,5
1,0	2,45	0,045	0,178	-3,9
2,0	2,60	0,071	0,103	4,9
3,0	2,15	0,097	0,077	5,0
4,0	1,65	0,123	0,064	3,8
5,11	1,20	0,152	0,059	-3,1
6,0	0,96	0,175	0,059	-3,9
8,0	0,67	0,204	0,067	5,2
10,0	0,50	0,214	0,08	-3,3

*1 Наибольшая погрешность приближения.

*2 Диапазон погрешностей приближения.

*3 При $\mu d = 10$.

Таблица 5.24

Константы A_1 , α_1 и α_2 для представления энергетического фактора накопления из табл. 5.14 [90] без учета вторичных излучений в экспоненциальной форме для точечного изотропного источника в бесконечной среде [46]

$$B_s = A_1 \exp(-\alpha_1 \mu d) + (1 - A_1) \exp(-\alpha_2 \mu d)$$

E_0 , МэВ	A_1	$-\alpha_1$	α_2	Наибольшая погрешность приближения, %
Вода				
0,7	20,0	0,115	-0,039	18,5
1,0	12	0,095	0,016	15
2,0	6,4	0,067	0,086	9,0
3,0	4,9	0,059	0,1082	6,5
4,0	4,0	0,050	0,1195	6,0
Железо				
0,5	11,0	0,0884	0,0185	—
1,0	9,0	0,082	0,0257	—
2,0	6,0	0,0735	0,040	—
3,0	4,6	0,0725	0,059	—
4,0	3,5	0,0730	0,065	—
6,0	2,6	0,0785	0,0718	—
8,0	2,0	0,0851	0,0588	—
10,0	1,6	0,093	0,0363	—
Свинец				
0,5	2,20	0,013	0,140	-4,4
1,0	2,65	0,038	0,141	-4,8
2,0	2,68	0,0568	0,1385	-4,3
3,0	2,18	0,080	0,133	-4,6
4,0	1,68	0,105	0,125	-5,0
5,11	1,19	0,136	0,1135	-5,3
6,0	0,87	0,1675	0,0995	0,9
8,0	0,45	0,206	0,0159	2,1
10,0	0,30	0,221	0	3,1

Таблица 5.25

Константы A_1 , α_1 и α_2 для представления фактора накопления поглощенной энергии в воде и железе и кермы в бетоне в экспоненциальной форме для точечного изотропного источника в бесконечной среде

$$B_{n(k)} A_1 \exp(-\alpha_1 \mu d) + (1 - A_1) \exp(-\alpha_2 \mu d)$$

Вода [46] (аппроксимированы факторы накопления поглощенной энергии из [90] без учета вторичных излучений)

E_0 , МэВ	A_1	$-\alpha_1$	α_2
1	13,5	0,100	0,010
2	8,1	0,068	0,0405
3	5,6	0,059	0,073
4	4,5	0,0555	0,11
6	3,4	0,0525	0,156
8	2,8	0,5	0,17
10	2,5	0,0473	0,1719

Бетон обычный [101] [аппроксимированы данные табл. 5.15 [100] факторов накопления кермы с учетом аннигиляционного излучения, без учета тормозного и флуоресцентного излучений для $E_0 = 0,015 \div 15$ МэВ]

E_0 , МэВ	A_1	$-\alpha_1$	α_2	Диапазон погрешностей приближения, %
-------------	-------	-------------	------------	--------------------------------------

 $\mu d = 0 \div 40$

0,015	0,9255	0,00399	0,01695	+1,22—4,99
0,02	1,2440	0,00102	0,09200	+1,55—4,42
0,03	1,6398	0,00415	0,30337	+4,47—4,92
0,04	2,3179	0,01513	0,36734	+5,85—5,44
0,05	7,0581	0,00761	0,10777	+16,93—4,88
0,06	7,1421	0,03187	0,17851	+7,92—9,44
0,08	24,0233	0,04028	0,05210	+4,16—4,99
0,1	61,6796	0,04981	0,00324	+11,74—5,04
0,15	260,7346	0,06637	-0,04993	+39,29—5,28
0,2	143,4989	0,08494	-0,05484	+55,85—5,18
0,3	224,3679	0,08069	-0,06453	+62,28—5,36
0,4	161,8871	0,07486	-0,05567	+59,57—5,43
0,5	137,5574	0,06805	-0,04841	+53,46—5,26
0,6	105,9964	0,06268	-0,04019	+47,34—5,32
0,8	108,5616	0,05015	-0,03239	+37,05—5,12
1,0	90,9227	0,04207	-0,02410	+29,64—4,97
1,5	78,0960	0,02849	-0,01322	+15,59—5,05
2,0	87,7179	0,01974	-0,00878	+8,39—4,94
3,0	45,7964	0,01509	0,00062	+3,22—4,06
4,0	39,5678	0,01080	0,00468	+1,63—0,81
5,0	25,8184	0,01094	0,00909	+0,22—4,99
6,0	28,0338	0,00751	0,00874	+1,07—2,59
8,0	33,1279	0,00639	0,00399	-0,17—4,26
10,0	18,2383	0,00933	0,00637	-0,07—4,45
15,0	12,1589	0,01149	0,00466	-0,04—3,84

Продолжение табл. 5.25

E_0 , МэВ	A_1	$-\alpha_1$	α_2	Диапазон погрешностей приближения, %
$\mu d = 0 \div 20$				
0,1	159,2075	0,04517	-0,02732	3,17—0,23
0,15	120,8385	0,09495	-0,06796	17,79—4,82
0,2	164,5764	0,10996	-0,09180	24,11—5,24
0,3	94,4355	0,11769	-0,09152	26,68—4,56
0,4	140,7196	0,10500	-0,09006	24,67—4,71
0,5	120,3629	0,09570	-0,08026	22,10—5,09
0,6	60,4439	0,09313	-0,06500	20,63—4,42
0,8	109,9079	0,07178	-0,05884	16,16—5,06
1,0	43,5765	0,06757	-0,03833	12,92—4,71
1,5	44,3209	0,04586	-0,02313	7,33—4,82
2,0	33,9879	0,03563	-0,00945	4,89—2,56

Железо [46] (аппроксимированы факторы накопления поглощенной энергии из [90] без учета вторичных излучений)

E_0 , МэВ	A_1	$-\alpha_1$	α_2
0,5	15,8	0,095	0,037
1,0	11,2	0,0865	0,045
2,0	6,5	0,076	0,073
3,0	4,5	0,078	0,088
4,0	3,4	0,082	0,0965
6,0	2,45	0,086	0,101
8,0	1,85	0,089	0,0895
10,0	1,55	0,096	0,048

Факторы накопления плоских источников с произвольным угловым распределением фотонов вида $(n+1) \cos^n \theta / (2\pi) B^{n,n}$ по известным факторам накопления плоских мононаправленных $B^{n,m}$ и изотропных $B^{n,n}$ источников легко получить, интегрируя выражение (5.15) по угловым переменным. Деля затем обе части полученного соотношения на $I_{np}^{n,n}(E_0, d)$ и прибавляя к обеим частям равенства по 1, получаем

$$B_3^{n,n} = p_1 k_1 B_3^{n,m} + p_2 k_2 B_3^{n,n}, \quad (5.53)$$

где

$$k_1 = \frac{e^{-\mu d}}{(n+1)E_{n+1}(\mu d)}; \quad k_2 = \frac{E_1(\mu d)}{(n+1)E_{n+1}(\mu d)}$$

$E_{n+1}(\mu d)$ — интегральная показательная функция; значения p_1 и p_2 определены формулами (5.35), (5.36).

По формуле (5.53) были рассчитаны факторы накопления косинусоидальных источников, приведенные для ряда бесконечных сред в табл. 5.19, 5.20.

Так как фактор накопления плавно изменяется с изменением атомного номера Z материала среды, то значения факторов накопления для любых Z можно получить путем интерполяции.

Коэффициенты a и b в формуле Бергера (5.47) для представления приведенных в табл. 5.13 дозовых факторов накопления точечного изотропного источника в бесконечных средах (в факторах накопления учтено аннигиляционное излучение, не учтено тормозное и флуоресцентное излучение). Таблица 5.26.

E_0 , МэВ	Воздух [105]			Вода [105]			Бетон [104]			Железо [105]		
	a	b	$\delta_{\text{макс}}^2, \%$	a	b	$\delta_{\text{макс}}^2, \%$	a	b	$\delta_{\text{макс}}^2, \%$	a	b	$\delta_{\text{макс}}^2, \%$
0,015	0,08	-0,034	8,0	0,09	0,036	8,1	0,01	0,03	2,15	0,00	—	1,0
0,02	0,23	-0,032	11,6	0,02	-0,032	10,9	0,03	0,04	4,07	0,02	-0,032	3,9
0,03	0,93	-0,009	11,8	1,01	0,006	10,0	0,10	0,04	10,5	0,01	-0,036	2,1
0,04	2,40	0,018	2,2	2,58	0,024	4,6	0,23	-0,03	16,2	0,02	0,032	3,9
0,05	4,05	0,050	14,2	4,36	0,057	16,5	0,46	0,02	16,6	0,04	-0,034	5,7
0,06	5,27	0,075	22,6	5,59	0,082	25,4	0,79	0,01	17,1	0,07	0,039	6,7
0,08	6,11	0,102	33,3	6,47	0,108	35,5	1,35	0,01	8,78	0,14	-0,034	9,2
0,1	5,93	0,113	39,3	6,11	0,120	40,8	1,76	0,03	9,69	0,24	-0,030	9,8
0,15	4,70	0,121	41,0	4,88	0,125	42,7	1,96	0,06	30,3	0,52	-0,015	7,1
0,2	3,94	0,113	40,8	4,13	0,118	39,3	2,01	0,07	29,7	0,77	0,004	2,0
0,3	3,10	0,094	37,0	3,18	0,096	38,2	1,91	0,07	27,6	1,06	0,022	7,2
0,4	2,61	0,079	32,5	2,67	0,080	33,7	1,87	0,06	26,0	1,15	0,033	10,8
0,5	2,29	0,067	29,2	2,32	0,068	29,9	1,57	0,06	32,6	1,16	0,036	12,2
0,6	2,05	0,058	25,7	2,07	0,059	26,7	1,56	0,05	21,1	1,14	0,036	12,8
0,8	1,71	0,045	20,8	1,74	0,045	21,4	1,48	0,04	20,3	1,09	0,032	12,7
1,0	1,50	0,035	17,2	1,50	0,036	17,0	1,31	0,03	18,7	1,03	0,028	11,6
1,5	1,16	0,021	10,7	1,16	0,021	10,6	1,03	0,02	10,8	0,88	0,020	8,6
2,0	0,97	0,013	6,6	0,97	0,013	7,1	0,94	0,01	10,1	0,76	0,018	8,4
3,0	0,75	0,005	2,6	0,74	0,005	2,5	0,67	0,01	9,58	0,66	0,014	4,8
4,0	0,61	0,001	1,2	0,62	0,000	0,9	0,63	0,00	7,75	0,56	0,015	4,1
5,0	0,53	-0,002	2,0	0,52	0,002	2,1	0,53	0,00	10,5	0,49	0,017	4,0
6,0	0,47	-0,004	1,9	0,47	0,005	2,0	0,46	0,00	5,37	0,42	0,021	2,9

Продолжение табл. 5.26

E_0 , МэВ	Воздух [105]			Вода [105]			Бетон [104]			Железо [105]		
	a	b	$\delta_{\text{макс}}^2, \%$	a	b	$\delta_{\text{макс}}^2, \%$	a	b	$\delta_{\text{макс}}^2, \%$	a	b	$\delta_{\text{макс}}^2, \%$
8,0	0,37	-0,004	3,7	0,38	-0,006	3,7	0,37	0,00	2,87	0,33	0,028	3,2
10,0	0,31	-0,004	3,9	0,31	-0,005	3,9	0,31	0,00	7,59	0,25	0,039	3,2
15,0	0,23	-0,006	3,1	0,23	-0,008	2,9	0,23	0,00	6,42	0,15	0,066	4,8

* Максимальная погрешность представления фактора накопления в форме Бергера.

Коэффициенты a и b в формуле Бергера (5.47) для представления приведенных в табл. 5.15 факторов накопления по керме в данной среде точечных изотропных источников в бесконечных средах (в факторах накопления учтено аннигиляционное излучение, не учтено тормозное и флуоресцентное излучение). Таблица 5.27.

E_0 , МэВ	Воздух [105]			Бетон [104]			Алюминий*1 [99]			Железо [105]		
	a	b	$\delta_{\text{макс}}^2, \%$	a	b	$\delta_{\text{макс}}^2, \%$	a	b	$\delta_{\text{макс}}^2, \%$	a	b	$\delta_{\text{макс}}^2, \%$
0,015	0,10	-0,040	7,9	0,01	-0,03	2,15	—	—	—	0,00	—	1,0
0,02	0,27	-0,032	12,0	0,03	-0,04	4,07	—	—	—	0,00	—	2,9
0,03	1,08	-0,008	9,8	0,10	-0,04	10,52	0,10	-0,032	10,7	0,01	0,039	1,6
0,04	2,69	0,024	4,8	0,24	-0,03	16,13	0,30	-0,035	14,6	0,02	-0,032	3,9
0,05	4,48	0,057	16,4	0,49	-0,02	19,10	—	—	—	0,04	0,034	5,7
0,06	5,67	0,082	25,1	0,89	-0,01	20,63	1,13	-0,014	12,9	0,08	-0,043	7,2
0,08	6,41	0,108	35,4	2,01	0,01	8,22	2,23	0,014	3,9	0,18	-0,039	11,7
0,1	5,71	0,121	42,5	2,94	0,03	9,34	2,80	0,041	14,1	0,36	-0,037	14,1
0,15	4,71	0,125	42,7	3,62	0,06	22,86	2,57*3	0,114	17,8	1,56	0,001	4,9
0,2	4,11	0,117	38,6	2,96	0,08	49,78	—	—	—	2,10	0,022	6,9
0,3	3,13	0,096	37,4	2,93	0,07	35,37	—	—	—	2,06	0,034	10,8
0,4	2,63	0,080	33,1	2,72	0,07	26,64	—	—	—	—	—	—

Продолжение табл. 5.27

E ₀ , МэВ	Вода [105]			Бетон [104]			Алюминий*1 [99]			Железо [105]		
	Дозовый [15, 93]		δ ^{max} , %	Дозовый [15, 93]		δ ^{max} , %	Дозовый [15, 93]		δ ^{max} , %	Дозовый [15, 93]		δ ^{max} , %
	a	b		a	b		a	b		a	b	
0,5	2,30	0,068	29,4	0,06	27,04	1,90	0,073	20,3	1,93	0,037	12,8	
0,6	2,07	0,058	26,4	0,05	29,17				1,78	0,037	13,6	
0,8	1,73	0,045	20,9	0,04	24,75				1,55	0,033	13,6	
1,0	1,51	0,035	17,1	0,03	22,11	1,41	0,035	17,2	1,32	0,030	13,6	
1,5	1,17	0,021	10,6	0,02	11,68				1,10	0,020	8,6	
2,0	0,98	0,013	6,8	0,01	10,94	0,95	0,015	6,9	0,94	0,016	6,6	
3,0	0,76	0,004	2,5	0,01	10,23				0,72	0,013	4,1	
4,0	0,62	0,0	1,3	0,00	6,67				0,57	0,013	4,1	
5,0	0,53	-0,002	2,1	0,00	7,11	0,51	0,003	1,9	0,45	0,016	5,0	
6,0	0,46	-0,003	3,3	0,00	2,15				0,38	0,019	4,4	
8,0	0,38	-0,005	4,6	0,00	6,25	0,35	0,003	3,0	0,27	0,027	3,7	
10,0	0,32	-0,006	4,0	0,00	3,90	0,28	0,006	3,6	0,21	0,035	3,5	
15,0	0,23	-0,006	3,7	0,00	7,84				0,11	0,063	4,6	

*1 Энергия отсечки в работе принята равной 0,02 МэВ.

*2 Максимальная погрешность представления факторов накопления в форме Бергера.

*3 Коэффициенты рассчитаны для толщины среды до 20 д. с. п.

Таблица 5.28

Коэффициенты a и b в формуле Бергера (5.47) для представления фактора накопления точечного изотропного источника в бесконечной среде из различных элементов и воды

Вид фактора накопления	Дозовый [15, 93]			Дозовый [15, 93]			Поглощенной энергии [15, 93]			Энергетический*1 [78]		
	Дозовый [15, 93]		Макси- мальная погреш- ность, %	Дозовый [15, 93]		Макси- мальная погреш- ность, %	Поглощенной энергии [15, 93]		Макси- мальная погреш- ность, %	Энергетический*1 [78]		0 ÷ 10 д.с.п.
Диапазон расстояний	a	b		a	b		a	b		a	b	
E ₀ , МэВ	0 ÷ 7 д.с.п.			0 ÷ 20 д.с.п.			0 ÷ 20 д.с.п.			0 ÷ 10 д.с.п.		
0,255	1,7506	0,2609	10	2,5048	0,1623	30	2,4039	0,1598	1,9716	0,1996		
0,5	1,3245	0,2078	5	1,8035	0,1224	25	1,7128	0,1201	1,4763	0,1599		
1	1,0622	0,1052	3	1,2282	0,0649	11	1,2443	0,0660	0,751	0,0853		
2	0,8093	0,0408	1	0,8594	0,0240	5	0,8829	0,0243	0,7239	0,0334		
3	0,6876	0,0125	1	0,7004	0,0074	2	0,7506	0,0065	0,5779	0,0099		
4	0,5800	0,0024	1	0,5826	0,0014	1	0,5905	0,0012	0,4705	0,0032		
6	0,4655	-0,0126	1	0,4853	-0,0082	1	0,4550	-0,0079	0,3635	-0,0083		
8	0,3860	-0,0214	1	0,3741	-0,0124	2	0,3758	-0,0121	0,2957	-0,0121		
10	0,3342	-0,0257	1	0,3206	-0,0139	2	0,3036	-0,0133	0,2620	-0,0157		
Вода												
0,5	1,2435	0,1250	3	1,4412	0,0850	12	1,7237	0,0902	1,3592	0,1139		
1	0,9589	0,0864	3	1,0831	0,0535	9	1,2204	0,0553	0,9796	0,0749		
2	0,7267	0,0486	2	0,7869	0,0266	6	0,8480	0,0268	0,6619	0,0394		
3	0,6294	0,0227	1	0,6504	0,0137	3	0,6746	0,0134	0,5292	0,0203		
4	0,5253	0,0127	1	0,5343	0,0082	2	0,5411	0,0079	0,4342	0,0105		
6	0,4177	0,0061	1	0,4182	0,0063	1	0,3995	0,0060	0,3303	0,0091		
8	0,3371	0,0050	1	0,3366	0,0058	1	0,3079	0,0060	0,2668	0,0066		
10	0,2752	0,0055	1	0,2738	0,0074	1	0,2492	0,0074	0,2189	0,0099		
Алюминий												

Вид фактора накопления	Дозовый [15, 93]				Дозовый [15, 93]				Поглощенной энергии [15, 93]				Энергетический* [78]	
	0 ÷ 7 д.с.п.				0 ÷ 20 д.с.п.				0 ÷ 20 д.с.п.				0 ÷ 10 д.с.п.	
	a	b	Максимальная погрешность, %	Максимальная погрешность, %	a	b	Максимальная погрешность, %	Максимальная погрешность, %	a	b	Максимальная погрешность, %	Максимальная погрешность, %	a	b

Железо

0,5	0,9081	0,0752	2	0,9814	0,0548	7	1,7887	0,0550	7	0,9632	0,0690
1	0,8214	0,0684	2	0,8932	0,0460	7	1,2192	0,0466	8	0,8100	0,0625
2	0,7020	0,0319	3	0,7173	0,0277	4	0,7868	0,0280	4	0,5872	0,0410
3	0,5323	0,0384	1	0,5571	0,0261	4	0,5847	0,0255	4	0,4658	0,0337
4	0,4366	0,0358	1	0,4518	0,0268	3	0,4494	0,0281	2	0,3721	0,0330
6	0,3271	0,0457	1	0,3381	0,0368	3	0,2975	0,0353	3	0,2693	0,0399
8	0,2653	0,0464	1	0,2603	0,0428	2	0,2076	0,0420	2	0,2032	0,0471
10	0,1876	0,0592	1	0,1902	0,0553	1	0,1565	0,0528	1	0,1616	0,0546

Олово

0,5	0,5608	-0,0146	1	-0,5457	-0,0063	3	1,1873	-0,0069	4	0,5529	-0,0118
1	0,6219	0,0244	1	0,6378	0,0180	3	1,0819	0,0134	3	0,5969	0,0237
2	0,5498	0,0338	1	0,5678	0,0254	3	0,7490	0,0245	4	0,4889	0,0318
3	0,4379	0,0479	1	0,4533	0,0388	3	0,4909	0,0380	4	0,3714	0,0454
4	0,3583	0,0601	1	0,3700	0,0518	3	0,3352	0,0534	9	0,2966	0,0571
6	0,2369	0,0925	1	0,2401	0,0891	2	0,1931	0,0820	8	0,1929	0,0867
8	0,1692	0,1103	1	0,1669	0,1145	1	0,1237	0,1030	2	0,1362	0,1050
10	0,1232	0,1190	1	0,1190	0,1278	5	0,0930	0,1148	4	0,1002	0,1142

Вольфрам

0,5	0,2938	-0,0751	2	0,2693	-0,0477	5				0,2753	-0,0593
1	0,4425	-0,0255	1	0,4279	-0,0150	2				0,4182	-0,0199

Вид фактора накопления	Дозовый [15, 93]				Дозовый [15, 93]				Поглощенной энергии [15, 93]				Энергетический* [78]	
	0 ÷ 7 д.с.п.				0 ÷ 20 д.с.п.				0 ÷ 20 д.с.п.				0 ÷ 10 д.с.п.	
	a	b	Максимальная погрешность, %	Максимальная погрешность, %	a	b	Максимальная погрешность, %	Максимальная погрешность, %	a	b	Максимальная погрешность, %	Максимальная погрешность, %	a	b

2	0,4172	0,0080	1	0,4163	0,0070	4						0,3800	0,0070
3	0,3501	0,0295	1	0,3484	0,0324	2						0,2989	0,0356
4	0,2710	0,0666	1	0,2727	0,0653	1						0,2264	0,0667
6	0,1771	0,1049	1	0,1704	0,1160	2						0,1424	0,1060
8	0,1245	0,1223	1	0,1161	0,1405	6						0,0997	0,1200
10	0,0974	0,1238	1	0,0882	0,1510	7						0,0786	0,1216

Свинец

0,255

0,5	0,2526	-0,0848	2	0,2243	-0,0500	5	0,4551	-0,0753	10				
1	0,3779	-0,0403	1	0,3530	-0,0211	4	0,7027	-0,0278	7	0,2394	-0,0693		
2	0,3862	0,0032	1	0,3791	0,0021	4	0,5510	-0,0014	3	0,3513	-0,0304		
3	0,3267	0,0253	1	0,3244	0,0279	1	0,3476	0,0251	2	0,3437	0,0009		
4	0,2530	0,0547	1	0,2526	0,0557	1	0,2227	0,0532	1	0,2797	0,0287		
5,1	0,1936	0,0839	1	0,1904	0,0883	2	0,1646	0,0818	3	0,2179	0,0529		
6	0,1622	0,1027	1	0,1554	0,1143	4				0,1629	0,0815		
8	0,1220	0,1112	2	0,1075	0,1440	12	0,1167	0,1060	5	0,1344	0,1000		
10	0,0939	0,1167	2	0,0824	0,1513	12	0,0781	0,1269	8	0,0954	0,1161		
							0,0588	0,1327	15	0,0763	0,1147		

Уран

0,5	0,1825	-0,0951	2	0,1635	-0,0606	5						0,1719	-0,0767
1	0,3204	-0,0599	2	0,2991	-0,0385	5						0,2999	-0,0488
2	0,3321	-0,0162	1	0,3240	-0,0084	2						0,3005	-0,0115
3	0,2814	0,0196	1	0,2781	0,0234	1						0,2434	0,0240

Вид фактора накопления	Дозовый [15, 93]			Дозовый [15, 93]			Поглощенной энергии [15, 93]			Энергетический*1 [78]	
	0 ÷ 7 д.с.п.			0 ÷ 20 д.с.п.			0 ÷ 20 д.с.п.			0 ÷ 10 д.с.п.	
	a	b	Максимальная погрешность, %	a	b	Максимальная погрешность, %	a	b	Максимальная погрешность, %	a	b
E ₀ , МэВ											
4	0,2283	0,0458	1	0,2273	0,0475	1				0,1977	0,0445
6	0,1476	0,0916	1	0,1426	0,1011	2				0,1258	0,0880
8	0,1081	0,1076	1	0,1004	0,1274	5				0,0885	0,1060
10	0,0798	0,1163	1	0,0721	0,1442	7				0,0689	0,1113

*1 Погрешность того же порядка, что и исходные данные.

Коэффициенты *a*, *b* в формуле Бергера (5.47) для представления факторов накопления для точечного изотропного источника в бесконечной среде из воздуха, бетонов и других материалов при толщине среды до 20 д.с.п. [15, 97]

Вид фактора накопления	Дозовый*1			Поглощенной энергии		
	E ₀ , МэВ	a	b	Максимальная погрешность, %	a	b
Обычный бетон						
0,5	1,3029	0,08610	18	1,6568	0,08538	13
1,0	1,0914	0,04566	15	1,1633	0,05325	10
2,0	0,8126	0,01980	9	0,8203	0,02465	5
3,0	0,6731	0,00942	4	0,6702	0,01221	3
4,0	0,5953	0,00299	2	0,5672	0,00753	2
6,0	0,4915	-0,00159	3	0,4583	0,00168	1
8,0	0,4164	-0,00172	6	0,3985	0,00084	1
10,0	0,3585	-0,00005	9	0,3609	0,00083	1
Магнетитовый бетон						
0,5	1,0971	0,06458	8	1,6607	0,06696	8
1,0	0,9281	0,04768	8	1,1664	0,04877	8
2,0	0,7318	0,02620	5	0,8170	0,02591	5
3,0	0,6154	0,01836	4	0,6386	0,01747	3
4,0	0,5308	0,01513	3	0,5263	0,01428	3
6,0	0,4345	0,01118	2	0,4224	0,00705	3
8,0	0,3752	0,01153	2	0,3390	0,01010	2
10,0	0,3245	0,01199	2	0,3006	0,00999	2
Баритовый бетон						
0,5	0,7002	0,01624	1	1,3542	0,01056	4
1,0	0,7237	0,03007	4	1,1102	0,02792	3
2,0	0,6270	0,02373	4	0,7672	0,02229	3
3,0	0,5367	0,02158	4	0,5806	0,01995	3
4,0	0,4645	0,02122	3	0,4689	0,01948	2
6,0	0,3727	0,02233	3	0,3403	0,02045	2
8,0	0,3172	0,02588	2	0,2787	0,02251	2
10,0	0,2667	0,02878	2	0,2420	0,02368	1
Воздух						
0,5	1,6001	0,10094	18	1,5411	0,09920	17
1,0	1,1571	0,05749	11	1,1305	0,05687	11
2,0	0,8363	0,02430	5	0,8257	0,02407	5
3,0	0,6974	0,01017	3	0,6872	0,01002	3
4,0	0,6081	0,00324	1	0,6020	0,00323	1
6,0	0,5146	-0,00316	1	0,5080	-0,00289	1
8,0	0,4635	-0,00362	1	0,4567	-0,00349	1
10,0	0,4235	-0,00350	1	0,4261	-0,00333	1

Продолжение табл. 5.29

Вид фактора накопления	Дозовый*1			Поглощенной энергии		
	E_0 , МэВ	a	b	Максимальная погрешность, %	a	b
Песок						
0,5	1,4474	0,08932	14	1,6641	0,09348	16
1,0	1,0876	0,05482	10	1,1729	0,05619	10
2,0	0,8077	0,02503	5	0,8343	0,02532	5
3,0	0,6758	0,01239	3	0,6833	0,01212	3
4,0	0,5875	0,00651	2	0,5844	0,00653	2
6,0	0,4886	0,00091	1	0,4734	0,00100	1
8,0	0,4334	0,00009	1	0,4175	-0,00055	1
10,0	0,3883	-0,00224	1	0,3800	-0,00034	1
Дерево						
0,5	1,6187	0,10280	19	1,5079	0,09921	17
1,0	1,1676	0,05802	11	1,1163	0,05688	11
2,0	0,8457	0,02392	5	0,8234	0,02388	5
3,0	0,7051	0,00913	3	0,6949	0,00915	3
4,0	0,6149	0,00253	1	0,6122	0,00276	1
6,0	0,5176	-0,00342	1	0,5186	-0,00343	1
8,0	0,4727	-0,00438	1	0,4729	-0,00445	1
10,0	0,4328	-0,00390	1	0,4430	-0,00403	1
Гидрид лития						
0,5	2,0198	0,13997	34			
1,0	1,2652	0,07091	16			
2,0	0,8391	0,02272	6			
3,0	0,6607	0,00546	2			
4,0	0,5778	-0,00157	1			
6,0	0,4671	-0,01017	2			
8,0	0,4047	-0,01213	3			
10,0	0,3676	-0,01135	3			

*1 Расчет для обычного бетона выполнен для дозового фактора накопления, для остальных сред — для кермы в ткани.

Если в точку детектирования поместить фантом из тканеэквивалентного материала, поле фотонного излучения изменится (см. § 1.5). Более того, максимум дозы в фантоме может сместиться в глубину на 0,5—2 см. Для оценки изменения дозового фактора накопления для различных материалов при помещении после защиты тканеэквивалентного фантома [114] в одномерной геометрии были рассчитаны факторы накопления по тканевой керме при нормальном падении фотонов плоского мононаправленного источника на защиту для двух геометрий: 1. В точке на глубине 5 д.с.п. в бесконечной среде. 2. На границе защитной среды толщиной 5 д.с.п. и следующего вплотную за ней тканеэквивалентного фантома в виде пластины толщиной 30 см. На рис. 5.4 для источников фотонов разных энергий показано изменение фактора накопления по керме для ткани для указанных двух геометрий. Такая задача, когда за барьерной защитой следует тканеэквивалентная среда, соответствует практической ситуации облучения персонала от излучений источников за защитой. Использование в этом случае факторов накопления для бесконечной геометрии защиты не позволяет корректно рассчитать тканевую дозу, получаемую оператором. Для возможности корректного расчета дозы на персонал в [114] были рассчитаны поправочные коэффициенты $c = B_K / B_\infty$, являющиеся отношением скорректированного фактора накопления B_K к обычно широко используемому на практике фактору накопления бесконечной защитной среды B_∞ . Скорректированный фактор накопления B_K определяется как фактор накопления на границе защитной среды толщиной 5 д.с.п. и тканеэквивалентного слоя толщиной 30 см, умноженный на отношение максимальной дозы в тканеэквивалентном фантоме к дозе на границе среды и фантома. Значения поправочных коэффициентов c приведены в табл. 5.30.

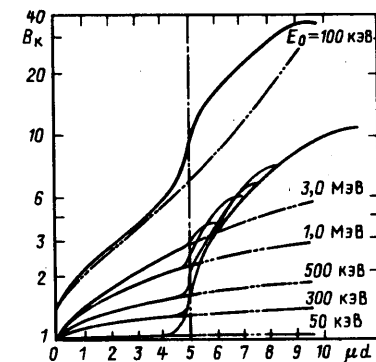


Рис. 5.4. Фактор накопления по тканевой керме в бесконечной свинцовой среде (---) и в композиции, состоящей из слоя свинца толщиной в 5 д.с.п. и следующего за ним слоя воды толщиной 30 см (—), для плоского мононаправленного источника моноэнергетических фотонов с энергией E_0 (нормальное падение излучения)

Такая задача, когда за барьерной защитой следует тканеэквивалентная среда, соответствует практической ситуации облучения персонала от излучений источников за защитой. Использование в этом случае факторов накопления для бесконечной геометрии защиты не позволяет корректно рассчитать тканевую дозу, получаемую оператором. Для возможности корректного расчета дозы на персонал в [114] были рассчитаны поправочные коэффициенты $c = B_K / B_\infty$, являющиеся отношением скорректированного фактора накопления B_K к обычно широко используемому на практике фактору накопления бесконечной защитной среды B_∞ . Скорректированный фактор накопления B_K определяется как фактор накопления на границе защитной среды толщиной 5 д.с.п. и тканеэквивалентного слоя толщиной 30 см, умноженный на отношение максимальной дозы в тканеэквивалентном фантоме к дозе на границе среды и фантома. Значения поправочных коэффициентов c приведены в табл. 5.30.

Таблица 5.30

Поправочный коэффициент $c = B_K / B_\infty$

E_0 , МэВ	Защитная среда					
	Вода	Алюминий	Железо	Олово	Свинец	Вольфрам
0,05	0,95	1,29	1,60	1,09	1,65	1,64
0,06	0,95	1,28	1,66	1,15	1,72	1,73
0,08	0,96	1,22	1,60	1,32	1,72	1,46
0,1	0,97	1,17	1,48	1,40	1,46	1,44
0,15	0,98	1,12	1,31	1,48	1,37	1,43
0,2	0,98	1,09	1,22	1,36	1,36	1,39
0,3	0,99	1,06	1,15	1,23	1,29	1,29
0,4	0,99	1,05	1,11	1,18	1,22	1,22
0,5	0,99	1,04	1,09	1,14	1,18	1,17
0,6	0,99	1,03	1,08	1,12	1,15	1,14
0,8	0,99	1,02	1,06	1,10	1,12	1,08
1,0	0,99	1,02	1,06	1,08	1,10	1,10
1,5	1,00	1,01	1,03	1,05	1,07	1,07
2,0	1,00	1,01	1,02	1,04	1,04	1,04
3,0	1,00	1,00	1,01	1,02	1,02	1,02

При использовании поправочных коэффициентов полезны следующие рекомендации:

1. Вследствие установления после толщины защиты в несколько длин свободного пробега квазиравновесного энергетического распределения рассеянного излучения поправочный коэффициент для толщины защиты в 2 д.с.п. и более сохраняется практически постоянным (с погрешностью 1%), кроме случаев, когда энергия источника фотонов близка, но выше энергии К-скачки для данной среды, например источник с $E_0=0,1$ МэВ в свинце. В последнем случае фактор накопления возрастает до 12 д.с.п.

2. При $E_0 \geq 3$ МэВ поправочный коэффициент становится небольшим и им в практических задачах можно пренебречь.

3. Приведенные поправочные коэффициенты рассчитаны для плоского мононаправленного источника.

Однако расчеты показали, что в пределах погрешности 5% они совпадают с поправочными коэффициентами для плоского изотропного источника. Так как изотропный и мононаправленный — два крайних угловых распределения излучения источников, можно сделать вывод, что представленные поправочные коэффициенты с погрешностью 5% применимы для любых угловых распределений излучения плоского источника.

Факторы накопления для барьерной геометрии приведены в табл. 5.31—5.34.

Таблица 5.31

Энергетические факторы накопления для плоского мононаправленного источника и защиты конечной толщины (расчет методом Монте-Карло) (нормальное падение излучения на защиту) [78]

E_0 , МэВ	μd					
	0,5	1	2	4	8	16
Вода						
0,66	1,49	1,96	3,10	5,99	13,3	39,4
1,0	1,40	1,80	2,72	5,01	10,5	25,7
4,0	1,22	1,42	1,83	2,60	4,21	7,20
Железо						
1,0	1,40	1,72	2,43	4,07	7,80	17,8
4,0	1,20	1,36	1,72	2,50	4,17	7,45
10,0	1,07	1,16	1,35	1,75	2,80	5,85
Олово						
1,0	1,29	1,56	2,10	3,15	5,31	10,2
4,0	1,16	1,31	1,63	2,35	4,12	9,41
10,0	1,06	1,12	1,26	1,59	2,75	8,22
Свинец						
1,0	1,20	1,35	1,63	2,09	2,87	4,24
4,0	1,11	1,23	1,44	1,98	3,28	7,46
10,0	1,03	1,08	1,17	1,40	2,17	6,47

Таблица 5.32

Дозовые факторы накопления для плоского мононаправленного источника и защиты конечной толщины (нормальное падение излучения на защиту) [67]

Значения этих факторов накопления получены из соотношения

$$B_{\lambda, \delta}(E_0, \mu d, Z) = B_{\lambda, \infty}(E_0, \mu d, Z) \frac{B_{\lambda, \delta}(E_0, \mu d, Z)}{B_{\lambda, \infty}(E_0, \mu d, Z)}$$

E_0 , МэВ	μd					
	1	2	4	7	10	15
Вода						
1,0	1,84	2,81	5,33	9,68	15,1	25,9
4,0	1,53	2,01	2,96	4,39	5,86	8,08
Железо						
1,0	1,74	2,48	4,18	7,01	10,1	17,1
4,0	1,45	1,84	2,84	4,35	5,93	8,48
10,0	1,21	1,43	1,93	2,89	4,08	6,61
Олово						
1,0	1,58	2,15	3,25	4,94	6,83	9,92
4,0	1,37	1,77	2,63	4,14	6,12	—
10,0	1,15	1,32	1,75	2,74	4,42	9,30
Свинец						
1,0	1,3	1,66	2,15	2,77	3,37	4,13
4,0	1,27	1,55	2,17	3,25	4,64	7,64
10,0	1,10	1,24	1,54	2,27	3,52	7,68

Рассчитать факторы накопления в барьерной геометрии можно, исходя из факторов накопления для бесконечной геометрии и поправки на барьерность среды $k(E_0, \mu d, Z)$ или $\delta(E_0, Z)$.

Бергер и Доггет [15, 78] рассчитали поправки на барьерность среды для плоского мононаправленного источника в виде коэффициентов для энергетических факторов накопления для $1 \leq \mu d \leq 16$:

$$k(E_0, \mu d, Z) = \frac{B_{\lambda, \delta}^{n, m}(E_0, \mu d, Z) - 1}{B_{\lambda, \infty}^{n, m}(E_0, \mu d, Z) - 1} \quad (5.54)$$

и для $\mu d = 1$:

$$k'(E_0, \mu d, Z) = \frac{B_{\lambda, \delta}^{n, m}(E_0, \mu d, Z) - 1}{B_{\lambda, \infty}^{n, m}(E_0, \mu d, Z) - 1}, \quad (5.55)$$

где $B_{\lambda, \delta}^{n, m}$, $B_{\lambda, \infty}^{n, m}$, $B_{\lambda, \infty}^{n, m}$ — энергетические факторы накопления для барьерной, полубесконечной (источник на границе среды) и бесконечной геометрии защиты соответственно. Так как, начиная с $\mu d \geq 1,5$,

Таблица 5.33

Дозовые факторы накопления для плоского мононаправленного источника фотонов, падающих на слой бетона различной толщины μd^{*1} под различными углами θ_0 по отношению к нормали к слою [78]

$\cos\theta_0$	μd			
	0,5	1,0	2,0	4,0
$E_0 = 0,2$ МэВ				
1,0	1,51	1,95	2,99	5,24
0,75	1,56	2,05	3,56	9,57
0,50	1,61	2,49	6,20	41,4
0,25	1,99	5,63	—	—
0,10	8,20	—	—	—
$E_0 = 0,5$ МэВ				
1,0	1,45	1,92	2,90	5,45
0,75	1,53	2,04	3,39	9,02
0,50	1,61	2,42	5,56	40,1
0,25	1,97	5,17	—	—
0,10	7,61	—	—	—
$E_0 = 1,0$ МэВ				
1,0	1,42	1,79	2,58	4,57
0,75	1,46	1,90	3,13	7,71
0,50	1,57	2,24	4,65	23,4
0,25	1,90	4,37	—	—
0,10	6,56	—	—	—
$E_0 = 2,0$ МэВ				
1,0	1,35	1,67	2,38	3,80
0,75	1,42	1,82	2,77	5,65
0,50	1,55	2,23	3,98	16,0
0,25	1,82	3,75	—	—
0,10	5,63	—	—	—

*1 Толщина по нормали к слою.

$B_{z, \frac{1}{2} \infty}$ практически равен $B_{z, \infty}$, то для определения $B_{z, \text{бар}}^{п.м}$ из формулы (5.54) при $\mu d \geq 1,5$ вместо $B_{z, \frac{1}{2} \infty}^{п.м}$ можно принимать значения $B_{z, \infty}^{п.м}$.

Значения коэффициентов, определяемых формулами (5.54) и (5.55), приведены в табл. 5.35.

Поправочный коэффициент на барьерность среды для плоского изотропного источника совпадает в пределах погрешностей до 6% с соответствующими поправочными коэффициентами для плоского мононаправленного источника [89].

Таблица 5.34
Дозовые факторы накопления для плоского мононаправленного источника фотонов, падающих на слой бетона различной толщины μd^{*1} под различными углами θ_0 по отношению к нормали к слою [106]

$\cos\theta_0$	μd					
	1,0	2,0	4,0	6,0	8,0	10,0
$E_0 = 0,661$ МэВ						
1,0	1,94 ± 0,06	2,79 ± 0,07	5,05 ± 0,15	7,69 ± 0,21	11,1 ± 0,3	14,7 ± 0,4
0,75	1,90 ± 0,05	3,10 ± 0,10	7,26 ± 0,28	16,1 ± 0,65	33,7 ± 1,5	66,7 ± 3,1
0,50	2,37 ± 0,05	5,21 ± 0,15	31,6 ± 1,2	215,0 ± 9,0	1,52 · 10 ³ ± 7,0 · 10 ¹	—
0,25	4,55 ± 0,12	61,0 ± 2,2	1,96 · 10 ⁴ ± 8,0 · 10 ²	6,88 · 10 ⁶ ± 3,3 · 10 ⁵	—	—
$E_0 = 1,25$ МэВ						
1,0	1,75 ± 0,05	2,51 ± 0,07	4,39 ± 0,13	6,24 ± 0,18	8,09 ± 0,22	10,2 ± 0,3
0,75	1,87 ± 0,05	2,94 ± 0,09	5,78 ± 0,20	11,3 ± 0,4	20,6 ± 0,8	37,2 ± 1,4
0,50	2,12 ± 0,04	4,42 ± 0,12	19,6 ± 0,7	101,0 ± 4,0	541,0 ± 24,0	—
0,25	4,14 ± 0,11	43,3 ± 1,5	9,35 · 10 ³ ± 4,4 · 10 ²	2,24 · 10 ⁶ ± 1,1 · 10 ⁵	—	—
$E_0 = 2,50$ МэВ						
1,0	1,66 ± 0,04	2,14 ± 0,06	3,30 ± 0,09	4,59 ± 0,13	5,89 ± 0,17	7,09 ± 0,19
0,75	1,92 ± 0,06	2,71 ± 0,09	5,16 ± 0,19	9,13 ± 0,36	14,5 ± 0,6	23,8 ± 1,1
0,50	1,93 ± 0,04	3,55 ± 0,10	11,8 ± 0,4	40,6 ± 1,6	161,0 ± 7,9	—
0,25	3,24 ± 0,09	23,9 ± 0,9	2,80 · 10 ³ ± 1,4 · 10 ²	4,10 · 10 ⁶ ± 2,4 · 10 ⁴	—	—
$E_0 = 6,13$ МэВ						
1,0	1,42 ± 0,04	1,91 ± 0,06	2,56 ± 0,07	3,26 ± 0,10	4,08 ± 0,12	4,80 ± 0,14
0,75	1,68 ± 0,06	2,38 ± 0,08	4,05 ± 0,16	6,40 ± 0,33	9,47 ± 0,56	14,2 ± 1,0
0,50	1,75 ± 0,03	2,63 ± 0,06	5,99 ± 0,17	15,9 ± 0,7	47,3 ± 3,3	—
0,25	2,55 ± 0,08	10,1 ± 0,5	544,0 ± 37,0	4,02 · 10 ⁴ ± 3,3 · 10 ³	—	—

*1 Толщина по нормали к слою.

Таблица 5.35

Поправочный коэффициент $k(E_0, \mu d, Z)$ для расчета энергетического фактора накопления для плоского мононаправленного источника и защиты конечной толщины [78]

E_0 , МэВ	μd					
	1*	1	2	4	8	16
Вода						
0,66	0,601	0,663	0,713	0,783	0,785	0,784
1,0	0,661	0,720	0,754	0,821	0,828	0,830
4,0	0,849	0,885	0,912	0,920	0,926	0,933
Железо						
1,0	0,790	0,798	0,851	0,890	0,895	0,894
4,0	0,890	0,910	0,923	0,936	0,932	0,949
10,0	0,941	0,959	0,972	0,974	0,978	0,977
Олово						
1,0	0,889	0,911	0,924	0,935	0,938	0,946
4,0	0,941	0,926	0,955	0,967	0,974	0,978
10,0	0,951	0,960	0,962	0,973	0,971	0,969
Свинец						
1,0	0,939	0,951	0,969	0,975	0,979	0,982
4,0	0,941	0,977	0,982	0,990	0,992	0,994
10,0	0,986	0,990	0,995	0,992	0,994	0,995
Погрешность, %						
	±5	±2	±1,5	±1,5	±2,0	±2,5

*1 В этой графе приведена величина $k'(E_0, \mu d, Z)$, определяемая формулой (5.55).

Таблица 5.36

Отношение энергетических факторов накопления в барьерной геометрии к энергетическим факторам накопления в бесконечной среде для плоского мононаправленного источника [91]

$$\delta_3(E_0, Z) = \frac{B_{3, \alpha}(E_0, \mu d, Z)}{B_{3, \infty}(E_0, \mu d, Z)}$$

E_0 , МэВ	Вода	Железо
0,66	0,797	—
1,0	0,845	0,907
4,0	0,950	0,965

Таблица 5.37

Отношение дозовых факторов накопления в барьерной геометрии к дозовым факторам накопления в бесконечной среде для точечного изотропного источника $\delta_d(E_0, Z) = B_{d, \alpha}(E_0, \mu d, Z) / B_{d, \infty}(E_0, \mu d, Z)$

E_0 , МэВ	Вода	Алюминий	Железо	Олово,	Свинец
0,5	0,750	0,799	0,869	0,941	0,983
1,0	0,830	0,845	0,903	0,952	0,986
2,0	0,892	0,905	0,929	0,965	0,989
3,0	0,924	0,930	0,943	0,974	0,990
4,0	0,941	0,946	0,956	0,979	0,993
6,0	0,961	0,965	0,973	0,986	0,994
8,0	0,970	0,976	0,983	0,986	0,995
10,0	0,974	0,983	0,987	0,984	0,996

Предложенная в [91, 92] и приведенная в табл. 5.36 и 5.37 поправка на барьерность в виде

$$\delta(E_0, Z) = \frac{B_{\text{бар}}(E_0, \mu d, Z)}{B_{\infty}(E_0, \mu d, Z)} \quad (5.56)$$

более удобна, так как она практически не зависит от толщины среды μd .

Для больших энергий и материалов с большими Z расхождение между энергетическими факторами накопления для барьерной и бесконечной сред становится еще меньше.

Полезным может оказаться представление энергетического фактора накопления плоского мононаправленного источника фотонов при $\theta_0 = 0$ для барьерной геометрии и толщины защиты от 1 до 20 д.с.п. в виде [103]

$$B_3^{n,m}(\mu d) = B_0 + B_1 \exp(-C_1 \mu d), \quad (5.57)$$

где коэффициенты B_0 , B_1 и C_1 для набора сред при $E_0 = 1 \div 2$ МэВ приведены в табл. 5.38.

Для оценок поля излучения за защитой при наклонном падении фотонного излучения плоского мононаправленного источника под углом θ_0 на барьер толщиной μd (толщина измерена по нормали к барьеру) можно использовать формулы:

для мощности поглощенной дозы в воздухе

$$\dot{D}(\mu d, \theta_0 \neq 0) = \dot{D}(\mu d = 0, \theta_0 \neq 0) \exp(-\mu d) B_3^{n,m}(\mu d, \theta_0 = 0) \times \exp\{-[\sec(\beta_d \theta_0) - 1] \mu d\}; \quad (5.58)$$

для плотности потока энергии

$$I(\mu d, \theta_0 \neq 0) = I(\mu d = 0, \theta_0 \neq 0) \exp(-\mu d) B_3^{n,m}(\mu d, \theta_0 = 0) \times \exp\{-[\sec(\beta_s \theta_0) - 1] \mu d\}, \quad (5.59)$$

где $\dot{D}(\mu d = 0, \theta_0 \neq 0)$, $I(\mu d = 0, \theta_0 \neq 0)$ — мощность поглощенной дозы в воздухе и плотность потока энергии фотонов в точке детектирования без

Таблица 5.38

Коэффициенты для формулы (5.57) [103]*1

Коэффициент	E_0 , МэВ				Максимальная погрешность, %
	1,00	1,25	1,50	2,00	
Водород ($Z=1$)					
B_0	3,537+2	6,614+1	3,353+1	1,831+1	13
$-B_1$	3,532+2	6,538+1	3,259+1	1,725+1	
C_1	3,014-3	1,363-2	2,361-2	3,635-2	
Бериллий ($Z=4$)					
B_0	3,270+2	5,867+1	3,159+1	1,873+1	13
$-B_1$	3,265+2	5,788+1	3,063+1	1,768+1	
C_1	3,232-3	1,517-2	2,484-2	3,543-2	
Углерод ($Z=6$)					
B_0	2,653+2	5,680+1	3,117+1	1,869+1	12
$-B_1$	2,648+2	5,599+1	3,021+1	1,763+1	
C_1	3,920-3	1,551-2	2,498-2	3,530-2	
Воздух ($Z=7,2$)					
B_0	3,044+2	5,807+1	3,150+1	1,900+1	13
$-B_1$	3,039+2	5,727+1	3,054+1	1,795+1	
C_1	3,437-3	1,525-2	2,482-2	3,486-2	
Вода ($Z=10$)					
B_0	3,034+2	5,689+1	3,099+1	1,891+1	13
$-B_1$	3,030+2	5,609+1	3,002+1	1,786+1	
C_1	3,448-3	1,554-2	2,520-2	3,503-2	
Алюминий ($Z=13$)					
B_0	1,625+2	4,908+1	2,918+1	1,900+1	9
$-B_1$	1,619+2	4,823+1	2,820+1	1,795+1	
C_1	6,021-3	1,723-2	2,594-2	3,415-2	
Железо ($Z=26$)					
B_0	5,920+1	3,510+1	2,520+1	1,878+1	Меньше 6
$-B_1$	5,837+1	3,417+1	2,420+1	1,773+1	
C_1	1,402-2	2,160-2	2,775-2	3,272-2	
Свинец ($Z=82$)					
B_0	5,281+0	6,453+0	7,453+0	9,283+0	Меньше 6
$-B_1$	4,234+0	5,401+0	6,398+0	8,229+0	
C_1	6,285-2	5,456-2	4,836-2	3,836-2	

Продолжение табл. 5.38

Коэффициент	E_0 , МэВ				Максимальная погрешность, %
	1,00	1,25	1,50	2,00	
Уран ($Z=92$)					
B_0	4,539+0	5,600+0	6,607+0	8,301+0	Меньше 6
$-B_1$	3,495+0	4,551+0	5,556+0	7,250+0	
C_1	6,023-2	5,271-2	4,646-2	3,736-2	

*1 В таблице числа $a+b$ читать как $a \cdot 10^{\pm b}$.

защиты: $B_d^m(\mu d, \theta_0=0)$, $B_s^m(\mu d, \theta_0=0)$ — дозовый и энергетический факторы накопления плоского мононаправленного источника при нормальном падении излучения на барьер; β_d , β_s — параметры преломления для мощности поглощенной дозы в воздухе и плотности потока энергии [78], зависящие от E_0 , Z (рис. 5.5); величины θ_0 в формулах выражены в градусах. Формулы (5.58) и (5.59) достаточно точны для $\theta_0 \ll 55^\circ$ при $\mu d \lesssim 4$, для $\theta_0 \leq 44^\circ$ формулы дают погрешность 10 % при $\mu d < 10$.

Заметим, что из соотношений (5.58) и (5.59) можно определить факторы накопления для наклонного падения фотонного излучения на барьеры.

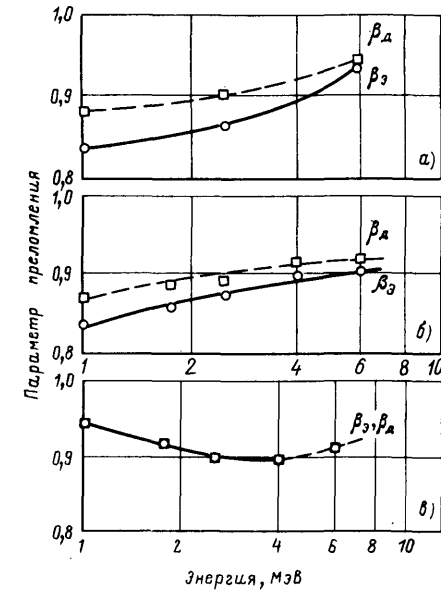


Рис. 5.5. Параметр преломления для мощности поглощенной дозы в воздухе β_d и плотности потока энергии β_s для формул (5.58) и (5.59) для бетона (а), железа (б) и свинца (в)

Пример. Рассчитать плотность потока энергии фотонного излучения за барьером из обычного бетона толщиной по нормали к барьеру в 4 д.с.л., если под углом 50° к нормали на каждый квадратный сантиметр защиты падает в $1 \text{ с } 10^3$ фотонов плоского мононаправленного источника с энергией 1 МэВ.

Решение. Расчет можно выполнить по формуле (5.59). Поточковая величина $I(\mu d=0, \theta_0=50^\circ)$ в формуле (5.59) равняется скалярному току энергии падающего излучения [10^3 фотон/($\text{см}^2 \cdot \text{с}$) \cdot 1 МэВ/фотон], деленному на косинус угла падения излучения на барьер, т. е. $I(\mu d=0, \theta_0=50^\circ)=1 \cdot 10^3/\cos 50^\circ=1,56 \cdot 10^3$ МэВ/($\text{см}^2 \cdot \text{с}$) Фактор накопления $B_3^{\text{м}}(\mu d=4, \theta_0=0^\circ)$ определим по формуле (5.57) для алюминия, так как $Z_{\text{бетон}} \approx Z_{\text{Al}}$, $B_3^{\text{м}}(\mu d=4, \theta_0=0^\circ)=B_0+B_1 \exp(-C_1 \mu d)=162,5-161,9 \exp(-0,006021 \cdot 4)=4,5$. Из рис. 5.5 $\beta_3=0,836$. Следовательно, $I(\mu d=4, \theta_0=50^\circ)=1,56 \cdot 10^3 \cdot \exp(-4) \cdot 4,5 \cdot \exp[-\text{sec}(0,836 \cdot 50)-1] \cdot 4=-32,8$ МэВ/($\text{см}^2 \cdot \text{с}$).

Большой интерес при решении многих практических задач представляет знание факторов накопления ограниченных сред.

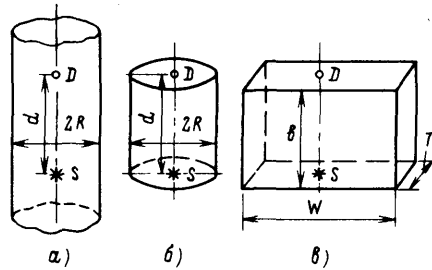


Рис. 5.6. К определению факторов накопления ограниченных сред

Исследования показали, что для однородных цилиндрических сред радиусом R с атомным номером Z для точечного изотропного источника S и детектора D , удаленных друг от друга на расстояние d и находящихся на оси симметрии цилиндра (рис. 5.6, а, б), фактор накопления ограниченной среды в виде цилиндра $B_{\text{орг}}$ связан с фактором накопления в бесконечной геометрии B_∞ (для геометрии задачи рис. 5.6, а) или с фактором накопления в барьерной геометрии $B_{\text{бар}}$ (для геометрии задачи 5.6, б) соотношением [94, 98]

$$\frac{B_{\text{орг}}(\mu d, R)-1}{B_{\infty}(\text{бар}) (\mu d, \infty)-1}=1-\exp[-K(E_0, R, d, Z)]. \quad (5.60)$$

Для расчета дозовых факторов накопления в точке D для источников фотонов S с энергией $0,5 \text{ МэВ} \leq E_0 \leq 8,0 \text{ МэВ}$ и $d \lesssim (10-15)/\mu$ для цилиндра бесконечной высоты и геометрии задачи на рис. 5.6, а [98]

$$K(E_0, R, d, Z)=\left(\frac{2,8}{d}+1,3 \cdot 10^{-3} Z\right) R. \quad (5.61)$$

Для легких рассеивателей (воды, алюминия) для источников с энергией фотонов $0,412 \text{ МэВ} \leq E_0 \leq 2,75 \text{ МэВ}$ и $d \lesssim 7/\mu$ для расчета энергетических факторов накопления цилиндров ограниченной высоты и геометрии задачи рис. 5.6, б [94]

$$K(E_0, R, d, Z)=2,5 \cdot 10^{-3} \frac{Z^{2,3}}{\mu} \frac{R}{d}, \quad (5.62)$$

где μ — коэффициент ослабления фотонов источника в материале цилиндра, см^{-1} . В формулах (5.61) и (5.62) d и R выражены в сантиметрах.

Для длинных прямоугольных параллелепипедов (рис. 5.6, в); у которых размер $W \gg b$, $W \gg T$ для точечных изотропных источников с энергией фотонов $0,412 \text{ МэВ} \leq E_0 \leq 2,75 \text{ МэВ}$ и детекторов, помещенных на противоположных торцевых поверхностях защиты на оси ограниченной среды, при $b \lesssim 10/\mu$ и $T \lesssim 6/\mu$ энергетические факторы накопления ограниченной и барьерной сред связаны соотношением [96]

$$\frac{B_{\text{орг}}(\mu b, T)-1}{B_{\text{бар}}(\mu b, \infty)-1}=1-\exp\left[-\frac{C}{\mu} \frac{T}{\sqrt[3]{b}}\right], \quad (5.63)$$

где C — постоянная, зависящая только от материала защиты и равная: для алюминия 0,08, титана 0,082, железа 0,252; T и b выражены в см, μ — в см^{-1} .

Фактор накопления фотонного излучения в бесконечной однородной среде с равномерно распределенными моноэнергетическими изотропными источниками B_∞ можно определить, если разделить характеристику поля излучения в геометрии широкого пучка с использованием аналитического представления фактора накопления по Бергеру на характеристику поля в геометрии узкого пучка.

Тогда для этой задачи

$$B_\infty=1+\frac{a}{(1-b)^2}, \quad (5.64)$$

где a, b — коэффициенты в представлении фактора накопления точечного изотропного источника по формуле (5.47).

Значения факторов накопления B_∞ , рассчитанных по формуле (5.64) с использованием коэффициентов a и b из [105], приведены в табл. 5.39.

Таблица 5.39

Дозовые факторы накопления фотонного излучения для бесконечной воздушной и водной среды B_∞ с равномерно распределенными изотропными источниками

E_0 , МэВ	Воздух	Вода	E_0 , МэВ	Воздух	Вода
0,015	1,07	1,08	0,50	3,63	3,67
0,02	1,22	1,24	0,60	3,31	3,34
0,03	1,91	2,00	0,80	2,87	2,91
0,04	3,49	3,71	1,0	2,61	2,61
0,05	5,49	5,90	1,5	2,21	2,21
0,06	7,16	7,63	2,0	2,00	2,00
0,08	8,58	9,13	3,0	1,76	1,75
0,10	8,54	8,89	5,0	1,53	1,52
0,15	7,08	7,37	6,0	1,47	1,46
0,20	6,01	6,31	8,0	1,37	1,38
0,30	4,78	4,89	10,0	1,31	1,31
0,40	4,08	4,15	15,0	1,23	1,23

Подобным образом, используя аналитическое представление факторов накопления по формуле (5.45), можно было бы записать:

$$B^\infty = \frac{A_1}{1 + \alpha_1} + \frac{1 - A_1}{1 + \alpha_2}, \quad (5.65)$$

где A_1 , α_1 , α_2 — коэффициенты в представлении фактора накопления точечного изотропного источника по формуле (5.45).

§ 5.4. ФАКТОРЫ НАКОПЛЕНИЯ ГЕТЕРОГЕННЫХ СРЕД

Факторы накопления гетерогенных сред зависят от всех параметров задачи, в том числе от энергии фотонов источника, числа слоев защиты, материала, порядка расположения и толщины отдельных слоев.

Рассмотрим некоторые возможные оценки фактора накопления гетерогенной N -слойной защиты $B_{\text{гет}} \left(\sum_{i=1}^N \mu_i d_i \right)$ с толщиной i -го слоя

$\mu_i d_i$, на выходе в которую расположен источник и $i=1$ соответствует слою вблизи источника, а детектор расположен за N -м слоем [9, 116].

1. Фактор накопления гетерогенной среды равен фактору накопления материала последнего слоя для полной оптической толщины защиты

$$B_{\text{гет}} \left(\sum_{i=1}^N \mu_i d_i \right) = B_N \left(\sum_{i=1}^N \mu_i d_i \right). \quad (5.66)$$

Эта формула дает неплохие результаты, если толщина последнего слоя $\mu_N d_N > 3$.

2. Фактор накопления принимается равным произведению факторов накопления отдельных слоев

$$B_{\text{гет}} \left(\sum_{i=1}^N \mu_i d_i \right) = \prod_{i=1}^N B_i(\mu_i d_i). \quad (5.67)$$

Очевидно, что эта оценка всегда приводит к значительной переоценке фактора накопления гетерогенной среды.

3. Фактор накопления усредняется по факторам накопления материалов каждого слоя с «весом», равным оптической толщине слоя,

$$B_{\text{гет}} \left(\sum_{i=1}^N \mu_i d_i \right) = \frac{\sum_{i=1}^N \left[B_i \left(\sum_{i=1}^N \mu_i d_i \right) \mu_i d_i \right]}{\sum_{i=1}^N \mu_i d_i}. \quad (5.68)$$

4. Метод эффективного атомного номера (метод гомогенизации среды). В основе такого подхода лежит определение эффективного атомного номера $Z_{\text{эф}}$ для гомогенизируемой гетерогенной композиции по формуле

$$Z_{\text{эф}} = \frac{\sum_{i=1}^N Z_i \mu_i d_i}{\sum_{i=1}^N \mu_i d_i}, \quad (5.69)$$

где Z_i — атомный номер материала i -го слоя.

Фактор накопления для найденных $Z_{\text{эф}}$ и толщины $\sum_{i=1}^N \mu_i d_i$ определяется путем интерполяции табличных значений факторов накопления.

Грубые предпосылки, неучет переходных эффектов вблизи грани слоев, неучет асимптотического поведения в формулах (5.66) — (5.69) обуславливают их заведомо оценочный характер.

Наиболее широко применяются для инженерных расчетов факторов накопления N -слойной гетерогенной среды $B_{\text{гет}} \left(\sum_{i=1}^N \mu_i d_i \right)$ для точечных

и плоских изотропных источников следующие формулы:

формула Д. Л. Бродера с сотр. [117—120]

$$B_{\text{гет}} \left(\sum_{i=1}^N \mu_i d_i \right) = B_N \left(\sum_{i=1}^N \mu_i d_i \right) + \sum_{n=1}^{N-1} \left[B_n \left(\sum_{i=1}^n \mu_i d_i \right) - B_{n+1} \left(\sum_{i=1}^n \mu_i d_i \right) \right]; \quad (5.70)$$

формула Китазума [121]

$$B_{\text{гет}} \left(\sum_{i=1}^N \mu_i d_i \right) = B_N \left(\sum_{i=1}^N \mu_i d_i \right) + \sum_{n=1}^{N-1} \left\{ \left[B_n \left(\sum_{i=1}^n \mu_i d_i \right) - B_{n+1} \left(\sum_{i=1}^n \mu_i d_i \right) \right] \times \right. \\ \left. \times \exp \left(- \sum_{v=n+1}^N \alpha_{v-1,v} \mu_v d_v \right) \right\}; \quad (5.71)$$

формула А. А. Викторова и В. П. Машковича [122]

$$B_{\text{гет}} \left(\sum_{i=1}^N \mu_i d_i \right) = B_N \left(\sum_{i=1}^N \mu_i d_i \right) + \sum_{n=1}^{N-1} \left\{ \left[B_n \left(\sum_{i=1}^n \mu_i d_i \right) - \right. \right. \\ \left. \left. - B_{n+1} \left(\sum_{i=1}^n \mu_i d_i \right) \right] \prod_{v=n+1}^N f_v \right\}; \quad (5.72)$$

формула Футерменгера с сотр. [123]

$$B_{\text{гет}} \left(\sum_{i=1}^N \mu_i d_i \right) = B_N \left(\sum_{i=1}^N \mu_i d_i \right) + \sum_{n=1}^{N-1} \left\{ \left[B_n \left(\sum_{i=1}^n \mu_i d_i \right) - B_{n+1} \left(\sum_{i=1}^n \mu_i d_i \right) \right] \times \right. \\ \left. \times \prod_{v=n+1}^N [(1 - \beta_{v-1,v}) \exp(-\alpha_{v-1,v} \mu_v d_v) + \beta_{v-1,v}] \right\}; \quad (5.73)$$

улучшенная формула Д. Л. Бродера с сотр. [78, 120]

$$B_{\text{гет}} \left(\sum_{i=1}^N \mu_i d_i \right) = B_N \left(\sum_{i=1}^N \mu_i d_i C_{i,N} \right) + \sum_{n=1}^{N-1} \left\{ \left[B_n \left(\sum_{i=1}^n \mu_i d_i C_{i,n} \right) - \right. \right. \\ \left. \left. - B_{n+1} \left(\sum_{i=1}^n \mu_i d_i C_{i,n+1} \right) \right] \exp \left(- \sum_{v=n+1}^N \alpha_{v-1,v} \mu_v d_v \right) \right\}. \quad (5.74)$$

где B_n — фактор накопления гомогенной среды из материала n -го слоя, взятый на соответствующей толщине защиты; $\alpha_{v-1,v}$, f_v — релаксационные множители — коэффициенты учета переходных эффектов вблизи границ раздела, зависящие от E_0 , материалов слоев защиты и их расположения; для двухслойных барьеров при $d_1 \geq 1,5/\mu_1$ и источников любого углового распределения излучения, симметричного относительно нормали к поверхности защиты, с энергией фотонов 0,5–7 МэВ

$$f_2(E_0, Z_2, \mu_2 d_2) = f_2(Z_2, \mu_2 d_2)^{1-0,08E_0}$$

где E_0 выражено в МэВ; $f_2(Z_2, \mu_2 d_2)$ приведено на рис. 5.7; β_{v-1} ; $C_{i,n}$ — коэффициенты для учета асимптотического поведения факторов накопления, $C_{i,n} = 1$ при $i = n$.

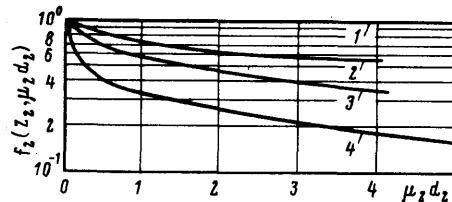


Рис. 5.7. Зависимость $f_2(Z_2, \mu_2 d_2)$ от толщины второго слоя барьера из воды (1), алюминия (2), железа (3) и свинца (4)

Формулы (5.70) — (5.73) для двухслойных защит имеют вид

$$B_{\text{рег}}(\mu_1 d_1 + \mu_2 d_2) = B_2(\mu_1 d_1 + \mu_2 d_2) + [B_1(\mu_1 d_1) - B_2(\mu_1 d_1)]K_{1,2}$$

где для формулы (5.70) $K_{1,2} = 1$; для формулы (5.71) $K_{1,2} = \exp(-\alpha_{1,2}\mu_2 d_2)$; для формулы (5.72) $K_{1,2} = f_2$; для формулы (5.73) $K_{1,2} = [(1 - \beta_{1,2})\exp(-\alpha_{1,2}\mu_2 d_2) + \beta_{1,2}]$.

Формула (5.74) для двухслойной среды имеет вид

$$B_{\text{рег}}(\mu_1 d_1 + \mu_2 d_2) = B_2(\mu_1 d_1 C_{1,2} + \mu_2 d_2) + [B_1(\mu_1 d_1) - B_2(\mu_1 d_1 C_{1,2})]\exp(-\alpha_{1,2}\mu_2 d_2)$$

Заметим, что формула (5.73) переходит в формулу (5.71) при $\beta_{v-1,v} = 0$ и в формулу (5.70) при $\beta_{v-1,v} = 0$ и $\alpha_{v-1,v} = 0$.

На рис. 5.8 сравниваются результаты расчетов по формулам (5.70) — (5.74).

Анализ расчетных данных позволяет сделать следующие выводы. Формула (5.70) во многих случаях (особенно для тяжелых сред, следующих за более легкими) не воспроизводит истинную зависимость фактора накопления от толщины защиты, так как, во-первых, в ней не учитываются переходные эффекты в области вблизи границ разделов слоев, и во-вторых, она недостаточно корректно учитывает поведение фактора накопления при большой толщине в асимптотической области. Первый недостаток формулы (5.70) устранен в формуле (5.71) введением релаксационных множителей, в формуле (5.72) — коэффициентов f_v . Оба недостатка формулы (5.70) устранены в формулах (5.73) и (5.74) введением релаксационных множителей и параметров $\beta_{v-1,v}$ и $C_{i,n}$ для учета асимптотического поведения факторов накопления.

Использование формул (5.71) и (5.73) затруднено из-за отсутствия в литературе необходимых для проведения расчетов коэффициентов $\alpha_{v-1,v}$, $\beta_{v-1,v}$.

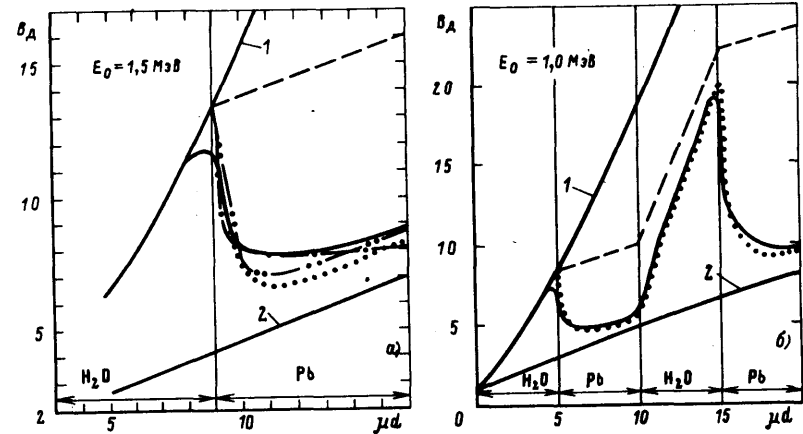


Рис. 5.8. Зависимость дозового фактора накопления плоского изотропного моноэнергетического источника фотонов с энергией E_0 , равной 1,5 МэВ (а) и 1,0 МэВ (б), от толщины свинцово-водной гетерогенной защиты:

— «точное» решение; — — — — расчет по формуле (5.70); — — — — расчет по формуле (5.72); — · — · — расчет по формуле (5.73) при $\alpha_{1,2} = 1,8$, $\beta_{1,2} = 0,2$; · · · · · — расчет по формуле (5.74); 1, 2 — зависимость фактора накопления от μd для воды и свинца соответственно

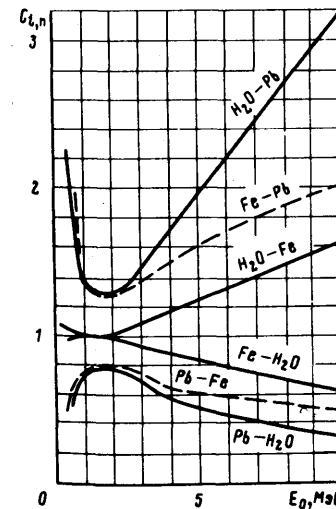


Рис. 5.9. Зависимость коэффициентов $C_{i,n}$ от энергии фотонов источника для расчета дозовых факторов накопления различных факторов накопления различных гетерогенных сред

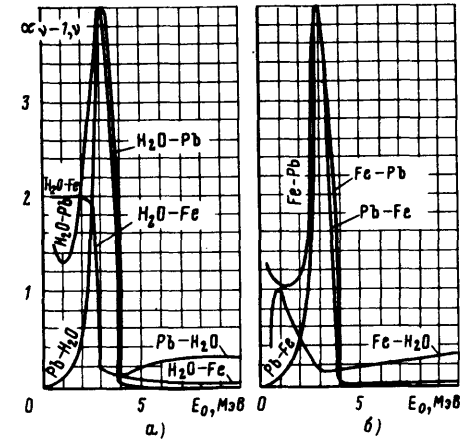


Рис. 5.10. Зависимость коэффициентов $\alpha_{v-1,v}$ от энергии фотонов источника для расчета дозовых факторов накопления различных гетерогенных сред

Зависимость коэффициентов $C_{l,n}$ и $\alpha_{n-1,n}$ от E_0 для использования в формуле (5.74) приведена на рис. 5.9 и 5.10.

Для любой из приведенных выше формул недостающие коэффициенты можно получить из расчетов или экспериментальных исследований.

Для гетерогенных барьеров для источников с угловым распределением излучения вида $(n+1)\cos^n\theta_0/(2\pi)$ фактор накопления можно оценить по формуле, подобной формуле (5.53) для однородных барьеров.

§ 5.5. УНИВЕРСАЛЬНЫЕ ТАБЛИЦЫ ДЛЯ РАСЧЕТОВ ЗАЩИТЫ ОТ ФОТОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ТОЧЕЧНЫХ ИЗОТРОПНЫХ ИСТОЧНИКОВ

Универсальные таблицы Н. Г. Гусева для расчета защиты от фотонного излучения точечных изотропных источников [124—126] нашли широкое применение при решении практических задач. Успех использования универсальных таблиц обусловлен удобством их представления и возможностью с помощью таблиц решать большой круг задач. В таблицах дается зависимость толщины защиты из различных материалов (воды, бетона, железа, свинца, вольфрама, урана) от энергии точечных изотропных моноэнергетических источников фотонов и кратности ослабления по дозе для бесконечной геометрии защиты.

Эти таблицы были рассчитаны в работах [124—126] с использованием дозовых факторов накопления точечных изотропных источников для бесконечной геометрии среды $B_d^{T,n}$ по данным [127]. Приведенные в этой работе $B_d^{T,n}$ даны для различных сред для энергий фотонов источника $E_0 \geq 0,5$ МэВ (для воды и для $E_0 = 0,255$ МэВ) и толщин защиты $\mu d \geq 1-2$ без учета вторичного (флуоресцентного, аннигиляционного и тормозного) излучения. Эти ограничения [127] стали причиной погрешностей расчетов защиты по универсальным таблицам вследствие неучета вторичных излучений и экстраполяции факторов накопления по энергии и толщине защиты в области малых энергий и толщин. Эти погрешности становятся значительными для тяжелых сред в области больших энергий из-за неучета тормозного и аннигиляционного излучения и для всех сред в области малых энергий и небольших толщин, где проводилась экстраполяция по энергии при $E_0 < 0,5$ МэВ и толщине при $\mu d < 1-2$. В области малых энергий и тяжелых сред (свинец, вольфрам, уран) погрешность обусловлена также неучетом флуоресцентного излучения.

В настоящей работе с использованием факторов накопления табл. 5.13 с учетом вторичных излучений для широкого изменения E_0 (0,015 МэВ $\leq E_0 \leq 15$ МэВ) и μd (0,5 $\leq \mu d \leq 40$), практически исключающих необходимость экстраполяции, приводящей к трудным оценочным погрешностям, на ЭВМ была рассчитана новая версия универсальных таблиц (см. табл. 5.40—5.45), лишенная отмеченных выше недостатков. Исключение составляют таблицы для вольфрама и урана, где использованные факторы накопления рассчитаны без учета тормозного и аннигиляционного излучения (см. табл. 5.13). Сравнение этих версий (рис. 5.11) показывает, что в области энергий 0,5 МэВ $\lesssim E_0 \lesssim 3$ МэВ, где вторичные излучения не вносят заметного вклада в факторы накопления и где отсутствовала необходимость в экстраполяции данных, обе версии таблиц совпадают с погрешностью расчетов факторов накопления и таблиц.

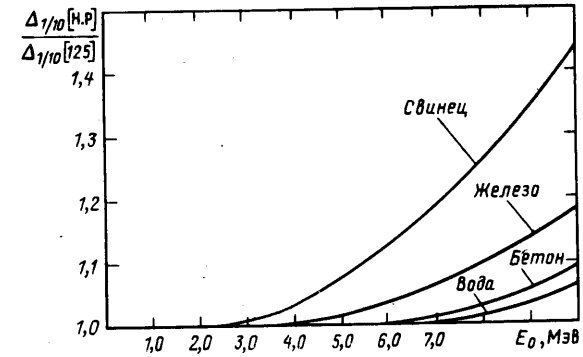


Рис. 5.11. Отношение первых слоев десятичного ослабления $\Delta_{1/10}$ [н.р.], рассчитанных в настоящей работе, к $\Delta_{1/10}$ [125], рассчитанных в работе [125], в зависимости от энергии фотонов источника для разных сред

В области тяжелых сред и больших энергий отношение слоев десятичного ослабления, рассчитанных по данным настоящей работы $\Delta_{1/10}$ [н.р.], и работы [125] $\Delta_{1/10}$ [125]: $\Delta_{1/10}$ [н.р.]/ $\Delta_{1/10}$ [125] для свинца и $E_0 = 10$ МэВ достигает 1,4 на первых толщинах среды. За счет экстраполяции в области $E_0 < 0,5$ МэВ значения $\Delta_{1/10}$ [н.р.] и $\Delta_{1/10}$ [125] могут различаться в несколько раз.

Для определения по универсальным таблицам толщины защиты в барьерной геометрии при $\mu d \geq 2$ надо требуемую для барьерной геометрии кратность ослабления излучения $k_{бар}$ умножить на поправку δ_d (см. табл. 5.37 или нижнюю строку в универсальных таблицах 5.40—5.45*) и для полученной кратности ослабления $k = k_{бар}\delta_d$ определить толщину защиты по универсальным таблицам. Учет барьерности особенно существен в области небольших энергий фотонов источника.

Пример 1. Рассчитать толщину барьера из воды, обеспечивающего предельно допустимые условия облучения персонала при работе с точечным изотропным источником ^{137}Cs , если на рабочем месте без защиты мощность дозы превышает предельно допустимые значения в 105 раз. Зависимость фактора накопления от взаимного расположения источника, защиты и детектора в расчетах не учитывать.

Решение. Для определения по универсальным таблицам толщины защиты в барьерной геометрии в соответствии с приведенными выше рекомендациями определяем кратность ослабления $k = k_{бар}\delta_d = 105 \cdot 0,763 \approx 80$, где δ_d — поправка на барьерность (см. табл. 5.40). Для $k = 80$ и $E_0 = 0,662$ МэВ определяем из универсальных таблиц требуемую толщину защиты $d = 90$ см.

Пример 2. Защита из свинца толщиной $d_1 = 12,3$ см при работе с точечным изотропным радионуклидным источником ^{60}Co ($E_0 = 1,25$ МэВ) обеспечивала на рабочем месте предельно допустимые условия облучения персонала. В связи с изменением условий проведения эксперимента увеличилось в $l = 2$ раза время работы с источником возросшей в $p = 10$ раз активностью. Определить, насколько

* Поправка δ_d для табл. 5.44 или 5.45 мала (не менее 0,98—0,99), поэтому в расчетах может не учитываться.

Таблица 5.40

Толщина защиты из воды, см ($\rho = 1,0 \text{ г/см}^3$)

Кратность ослабления k	Энергия фотонов, МэВ																Кратность ослабления k
	0,7																
	0,03	0,04	0,05	0,06	0,08	0,1	0,145	0,2	0,279	0,3	0,4	0,412	0,5	0,6	0,662	0,7	
1,5	4	10	16	20	24	26	25	23	22	21	21	20	19	19	19	19	1,5
2	6	12	18	22	27	29	29	29	28	27	27	27	27	27	27	27	2
5	9	18	24	29	35	38	40	41	42	43	43	44	45	46	47	47	5
8	11	20	28	33	39	42	45	46	48	48	50	52	53	54	55	55	8
10	12	21	29	34	41	44	47	49	51	53	55	57	58	59	60	61	10
20	14	25	33	39	47	50	54	57	60	63	66	68	71	74	76	77	20
30	16	27	36	42	50	54	58	61	64	68	71	75	78	81	83	85	30
40	17	28	38	44	52	56	60	64	68	71	75	78	81	83	85	88	40
50	18	30	40	47	55	60	64	68	72	73	77	80	84	86	88	90	50
60	18	30	40	47	55	60	64	68	72	73	77	80	84	86	88	90	60
80	19	32	42	49	57	62	67	71	75	76	78	80	84	86	88	90	80
100	20	33	43	50	59	64	69	73	78	78	83	87	91	94	96	99	100
2·10 ²	23	36	47	55	64	69	75	80	85	86	91	96	101	104	106	109	2·10 ²
5·10 ²	26	41	52	60	70	76	82	88	95	96	102	108	113	117	120	124	5·10 ²
10 ³	28	44	56	65	75	81	88	94	102	103	110	116	122	126	129	133	10 ³
2·10 ³	30	48	60	69	80	87	94	101	109	110	118	125	132	136	139	143	2·10 ³
5·10 ³	33	52	65	75	87	94	102	109	118	120	128	136	144	148	152	156	5·10 ³
10 ⁴	36	55	69	79	91	99	108	116	126	127	136	145	153	158	162	166	10 ⁴
2·10 ⁴	38	58	73	83	96	104	113	122	132	134	144	153	162	167	172	176	2·10 ⁴
5·10 ⁴	41	63	78	89	102	110	121	130	141	143	154	164	174	180	184	189	5·10 ⁴
10 ⁵	43	66	82	93	107	115	126	136	148	150	161	172	182	189	194	199	10 ⁵
2·10 ⁵	46	69	86	97	112	120	132	142	155	157	169	180	191	198	203	208	2·10 ⁵
5·10 ⁵	48	73	91	103	118	127	139	150	164	166	179	190	203	210	215	220	5·10 ⁵
10 ⁶	51	76	94	107	122	132	144	156	170	173	186	199	211	219	225	230	10 ⁶
2·10 ⁶	53	79	98	111	127	137	150	162	177	179	194	207	220	228	234	240	2·10 ⁶
5·10 ⁶	56	84	103	116	133	143	157	169	185	188	203	218	231	240	246	252	5·10 ⁶
10 ⁷	58	87	107	120	138	148	162	175	192	195	211	212	226	240	246	255	10 ⁷
δ _л												0,750	0,759	0,763	0,767	0,774	δ _л

Продолжение табл. 5.40

Кратность ослаб- ления k	Энергия фотонов, МэВ																Крат- ность ос- лабления k
	10,0																
	0,8	0,9	1,0	1,25	1,5	1,75	2,0	2,2	2,75	3,0	4,0	6,0	8,0	10,0			
1,5	18	19	18	19	19	20	21	22	22	22	24	26	28	30	30	30	1,5
2	27	28	28	29	29	30	31	32	34	34	34	41	45	47	47	47	2
5	47	48	49	52	54	57	60	62	67	68	68	85	93	98	98	98	5
8	56	58	59	63	66	70	72	75	83	84	84	106	117	124	124	124	8
10	60	62	63	68	71	75	78	81	90	91	91	116	128	136	136	136	10
20	72	75	76	83	87	92	96	100	111	111	113	146	161	172	172	172	20
30	79	82	84	91	96	102	107	111	123	125	125	163	180	192	192	192	30
40	84	87	89	97	102	108	114	118	131	134	134	175	194	207	207	207	40
50	87	91	93	101	107	114	119	124	138	140	140	184	204	218	218	218	50
60	90	94	96	105	111	118	124	129	143	146	146	192	213	228	228	228	60
80	95	99	102	110	117	124	131	136	152	154	154	204	226	242	242	242	80
100	98	103	105	115	122	129	136	142	158	161	161	213	236	253	253	253	100
2·10 ²	109	114	117	128	136	145	152	159	178	181	181	236	268	288	288	288	2·10 ²
5·10 ²	123	129	133	145	154	165	174	181	203	207	207	278	310	333	333	333	5·10 ²
10 ³	134	140	144	158	168	180	190	198	222	227	227	305	341	367	367	367	10 ³
2·10 ³	144	151	156	170	182	195	206	215	241	246	246	333	372	401	401	401	2·10 ³
5·10 ³	157	165	170	187	200	215	226	236	265	271	271	369	413	445	445	445	5·10 ³
10 ⁴	167	176	181	199	213	228	241	252	284	290	290	395	443	478	478	478	10 ⁴
2·10 ⁴	178	186	193	212	227	243	257	269	302	309	309	422	473	515	515	515	2·10 ⁴
5·10 ⁴	191	201	207	228	244	262	277	290	327	334	334	457	513	555	555	555	5·10 ⁴
10 ⁵	201	211	218	240	258	277	293	306	345	353	353	484	544	588	588	588	10 ⁵
2·10 ⁵	211	221	229	252	271	291	308	322	364	372	372	511	574	622	622	622	2·10 ⁵
5·10 ⁵	223	235	243	268	288	309	328	343	387	397	397	546	614	665	665	665	5·10 ⁵
10 ⁶	233	245	254	280	301	323	339	359	405	415	415	573	644	698	698	698	10 ⁶
2·10 ⁶	243	256	265	292	314	338	358	375	423	434	434	599	674	731	731	731	2·10 ⁶
5·10 ⁶	256	269	279	308	331	356	378	396	447	458	458	634	713	774	774	774	5·10 ⁶
10 ⁷	265	279	290	320	344	370	393	411	465	477	477	660	743	806	806	806	10 ⁷
δ _л	0,777	0,788	0,797	0,839	0,863	0,879	0,892	0,902	0,918	0,924	0,941	0,961	0,970	0,974	0,974	0,974	δ _л

Таблица 5.41

Толщина защиты из бетона, см ($\rho = 2,3 \text{ г/см}^3$)

Кратность ослабления k	Энергия фотонов, МэВ										Кратность ослабления k						
	0,03	0,04	0,05	0,06	0,08	0,1	0,145	0,2	0,279	0,3		0,4	0,412	0,5	0,6	0,662	0,7
1,5	0,2	0,6	1,2	4,3	3,7	4,9	6,4	7,2	7,5	7,5	7,6	7,6	7,6	7,6	7,7	7,7	1,5
2	0,4	0,9	1,7	4,5	4,8	6,2	8,0	9,0	9,8	9,9	10,4	10,4	10,8	11,1	11,3	11,2	2
5	0,8	1,8	3,2	5,0	7,6	9,7	12,5	14,3	15,8	16,2	17,5	17,5	18,5	19,3	19,8	19,9	5
8	1,0	2,2	3,9	5,7	9,0	11,3	14,6	16,8	18,6	19,0	20,7	20,9	22,0	23,1	23,8	23,8	8
10	1,0	2,4	4,2	6,2	9,6	12,1	15,6	17,9	19,9	20,4	22,2	22,4	23,6	24,8	25,6	25,6	10
20	1,3	3,0	5,2	7,5	11,5	14,4	18,4	21,2	23,7	24,3	26,6	26,9	28,4	29,9	30,9	31,0	20
30	1,5	3,4	5,8	8,3	12,6	15,7	20,1	23,1	25,8	26,5	29,1	29,4	31,1	32,9	34,0	34,1	30
40	1,6	3,6	6,2	8,9	13,4	16,7	21,2	24,4	27,4	28,1	30,8	31,2	33,0	34,9	36,1	36,2	40
50	1,7	3,8	6,5	9,3	14,0	17,4	22,1	25,5	28,5	29,3	32,2	32,6	34,5	36,5	37,7	37,9	50
60	1,8	4,0	6,8	9,6	14,5	18,0	22,8	26,3	29,4	30,2	33,3	33,6	35,6	37,7	39,0	39,2	60
80	1,9	4,2	7,2	10,2	15,3	19,6	24,8	28,6	32,0	32,9	36,3	36,7	38,9	41,2	42,7	42,9	80
100	2,0	4,4	7,5	10,6	15,8	20,6	26,6	30,6	34,0	34,8	38,3	38,7	41,2	43,2	44,7	44,9	100
2·10 ²	2,3	5,0	8,4	11,9	17,6	21,7	27,5	31,6	35,5	36,4	40,2	40,7	43,2	45,9	47,5	47,8	2·10 ²
5·10 ²	2,7	5,8	9,7	13,6	20,0	24,5	31,0	35,6	40,0	41,1	45,4	45,9	48,8	51,9	53,8	54,1	5·10 ²
10 ³	3,0	6,4	10,6	14,8	21,8	26,6	33,5	38,5	43,2	44,4	49,2	49,7	52,9	56,4	58,5	58,8	10 ³
2·10 ³	3,2	7,0	11,6	16,1	23,5	28,7	36,0	41,4	46,5	47,8	52,9	53,5	57,0	60,7	63,0	63,4	2·10 ³
5·10 ³	3,6	7,8	12,8	17,7	25,8	31,4	39,4	45,2	50,8	52,2	57,8	58,5	62,4	66,5	69,0	69,4	5·10 ³
10 ⁴	3,9	8,3	13,7	19,0	27,5	33,4	41,9	48,1	54,1	55,6	61,6	62,3	66,4	70,8	73,5	74,0	10 ⁴
2·10 ⁴	4,2	8,9	14,6	20,2	29,2	35,5	44,4	50,9	57,3	58,9	65,3	66,1	70,5	75,2	78,0	78,6	2·10 ⁴
5·10 ⁴	4,6	9,7	15,9	21,8	31,5	38,2	47,7	54,7	61,5	63,3	70,2	71,1	75,8	80,9	84,0	84,6	5·10 ⁴
10 ⁵	4,8	10,3	16,8	23,1	33,2	40,2	50,2	57,4	64,6	66,5	73,8	74,7	79,7	85,1	88,4	89,1	10 ⁵
2·10 ⁵	5,1	10,9	17,7	24,3	34,9	42,2	52,6	60,2	67,8	69,7	77,3	78,3	83,6	89,3	92,8	93,5	2·10 ⁵
5·10 ⁵	5,5	11,6	18,9	25,9	37,1	44,8	55,8	63,9	71,9	73,9	82,1	83,1	88,8	94,8	98,5	99,3	5·10 ⁵
10 ⁶	5,8	12,2	19,8	27,2	38,8	46,8	58,2	66,7	75,0	77,1	85,7	86,7	92,6	99,0	103	104	10 ⁶
2·10 ⁶	6,1	12,8	20,7	28,4	40,5	48,8	60,7	69,4	78,2	80,4	89,2	90,4	96,5	103	107	108	2·10 ⁶
5·10 ⁶	6,4	13,6	22,0	30,0	42,7	51,4	63,9	73,0	82,2	84,5	93,9	95,1	102	109	113	114	5·10 ⁶
10 ⁷	6,7	14,1	22,9	31,2	44,4	53,4	66,2	75,7	85,2	87,7	97,4	98,6	105	113	117	118	10 ⁷
δ ₁													0,799	0,810	0,815	0,819	δ ₁

Продолжение табл. 5.41

Кратность ослабления k	Энергия фотонов, МэВ										Кратность ослабления k				
	0,8	0,9	1,0	1,25	1,5	1,75	2,0	2,2	2,75	3,0		4,0	6,0	8,0	10,0
1,5	7,8	7,9	8,0	8,4	8,7	9,1	9,2	9,6	10,0	10,2	10,9	11,4	11,5	12,4	1,5
2	11,5	11,7	11,9	12,5	13,0	13,6	14,0	14,6	15,4	15,8	16,9	18,2	18,7	19,9	2
5	20,7	21,5	22,1	23,8	25,2	26,5	27,6	29,0	30,8	31,6	34,2	37,7	39,5	41,4	5
8	25,0	25,9	26,8	28,8	30,6	32,4	33,8	35,5	38,0	39,0	42,5	47,3	49,7	51,9	8
10	26,9	27,9	28,9	31,2	33,2	35,1	36,7	38,6	41,3	42,4	46,3	51,7	54,5	56,9	10
20	32,6	34,0	35,3	38,2	40,7	43,2	45,3	47,7	51,3	52,8	57,9	65,1	69,0	72,2	20
30	35,9	37,4	38,8	42,2	45,0	47,9	50,2	52,9	57,0	58,7	64,6	72,8	77,4	81,0	30
40	38,2	39,8	41,4	44,9	48,1	51,1	53,6	56,5	61,0	62,8	69,2	78,3	83,4	87,2	40
50	39,9	41,7	43,3	47,1	50,4	53,6	56,2	59,3	64,0	66,0	72,8	82,5	88,0	92,0	50
60	41,3	43,1	44,8	48,8	52,3	55,6	58,4	61,6	66,5	68,6	75,7	85,8	91,7	95,9	60
80	43,6	45,5	47,3	51,5	55,2	58,8	61,7	65,1	70,4	72,6	80,3	91,2	97,5	102	80
100	45,3	47,3	49,2	53,6	57,4	61,2	64,3	67,9	73,4	75,7	83,8	95,3	102	107	100
2·10 ²	50,5	52,8	55,0	60,0	64,4	68,7	72,2	76,3	82,6	85,3	94,6	108	116	121	2·10 ²
5·10 ²	57,2	59,9	62,4	68,2	74,4	80,0	82,4	87,1	94,6	97,8	109	125	134	141	5·10 ²
10 ³	62,3	65,2	68,0	74,4	80,0	85,5	90,1	95,3	104	107	119	137	148	155	10 ³
2·10 ³	67,1	70,4	73,4	80,4	86,7	92,7	97,7	103	112	116	130	149	161	169	2·10 ³
5·10 ³	73,6	77,1	80,5	88,2	95,2	102	108	114	124	128	143	165	179	188	5·10 ³
10 ⁴	78,5	82,3	85,9	94,2	102	109	115	122	133	137	154	178	192	202	10 ⁴
2·10 ⁴	83,3	87,4	91,3	100	108	116	122	130	141	146	164	190	206	216	2·10 ⁴
5·10 ⁴	89,8	94,2	98,4	108	117	125	132	140	153	158	177	205	223	235	5·10 ⁴
10 ⁵	94,5	99,2	104	114	123	132	140	148	161	167	188	218	236	249	10 ⁵
2·10 ⁵	99,2	104	109	120	130	139	147	156	170	176	198	230	250	263	2·10 ⁵
5·10 ⁵	105	111	116	127	138	148	157	166	181	188	211	245	267	281	5·10 ⁵
10 ⁶	110	116	121	133	144	155	164	174	190	197	221	257	280	295	10 ⁶
2·10 ⁶	115	121	126	139	151	162	171	181	198	206	231	269	293	309	2·10 ⁶
5·10 ⁶	121	127	133	146	159	170	180	191	209	217	244	285	310	327	5·10 ⁶
10 ⁷	126	132	138	152	165	177	188	199	218	226	254	297	323	341	10 ⁷
δ ₁	0,829	0,839	0,845	0,867	0,882	0,895	0,905	0,912	0,925	0,930	0,946	0,965	0,976	0,983	δ ₁

Толщина защиты из железа, см ($\rho = 7,89 \text{ г/см}^3$)

Таблица 5.42

Кратность ослабления k	Энергия фотонов, МэВ															Кратность ослабления k
	0,03	0,04	0,05	0,06	0,08	0,1	0,145	0,2	0,279	0,3	0,4	0,412	0,5	0,6	0,662	
1,5	0,01*	0,01*	0,03*	0,06	0,14	0,26	0,57	0,98	1,3	1,4	1,6	1,7	1,8	1,9	2,0	2,0
2	0,01	0,03	0,05	0,09	0,22	0,40	0,83	1,4	1,9	2,0	2,4	2,4	2,6	2,8	2,9	2,9
5	0,03	0,06	0,12	0,20	0,46	0,81	1,6	2,6	3,4	3,6	4,4	4,4	4,8	5,4	5,5	5
8	0,03	0,08	0,16	0,26	0,58	1,0	2,0	3,2	4,2	4,4	5,3	5,4	5,9	6,4	6,6	6,7
10	0,04	0,09	0,17	0,29	0,64	1,1	2,2	3,4	4,5	4,8	5,7	5,8	6,4	6,9	7,2	7,3
20	0,05	0,12	0,22	0,37	0,81	1,4	2,7	4,2	5,5	5,8	7,0	7,1	7,8	8,5	8,8	8,9
30	0,06	0,13	0,25	0,42	0,91	1,6	3,0	4,7	6,1	6,4	7,7	7,8	8,6	9,3	9,7	9,8
40	0,06	0,14	0,27	0,45	0,98	1,7	3,2	5,0	6,5	6,9	8,2	8,3	9,2	10,0	10,4	10,5
50	0,06	0,15	0,29	0,48	1,0	1,8	3,4	5,3	6,8	7,2	8,6	8,7	9,6	10,4	10,8	11,0
60	0,07	0,16	0,30	0,50	1,1	1,8	3,5	5,5	7,1	7,5	8,9	9,0	10,0	10,8	11,2	11,4
80	0,07	0,17	0,32	0,53	1,2	2,1	3,9	5,8	7,5	7,9	9,4	9,6	10,5	11,4	11,9	12,1
100	0,08	0,18	0,34	0,56	1,2	2,1	4,4	6,8	8,8	9,2	11,0	11,1	12,3	13,3	13,8	14,1
$2 \cdot 10^2$	0,09	0,20	0,39	0,64	1,4	2,3	4,4	6,8	8,8	9,2	11,0	11,1	12,3	13,3	13,8	14,1
$5 \cdot 10^2$	0,10	0,24	0,45	0,75	1,6	2,7	5,1	7,8	10,0	10,5	12,5	12,7	13,9	15,1	15,7	16,0
10^3	0,11	0,26	0,50	0,83	1,8	3,0	5,6	8,5	10,9	11,4	13,6	13,8	15,2	16,5	17,2	17,5
$2 \cdot 10^3$	0,12	0,29	0,55	0,91	1,9	3,3	6,0	9,2	11,8	12,4	14,7	15,0	16,5	17,8	18,6	18,9
$5 \cdot 10^3$	0,14	0,32	0,62	1,0	2,2	3,6	6,7	10,2	13,0	13,6	16,2	16,4	18,1	19,6	20,4	20,7
10^4	0,15	0,35	0,67	1,1	2,3	4,0	7,2	10,9	13,9	14,5	17,3	17,5	19,3	20,9	21,8	22,1
$2 \cdot 10^4$	0,16	0,37	0,71	1,2	2,5	4,2	7,7	11,6	14,8	15,5	18,4	18,6	20,5	22,3	23,2	23,5
$5 \cdot 10^4$	0,18	0,41	0,78	1,3	2,7	4,6	8,3	12,5	16,0	16,7	19,8	20,1	22,1	24,0	25,0	25,4
10^5	0,19	0,44	0,83	1,4	2,9	4,8	8,8	13,2	16,8	17,6	20,9	21,2	23,3	25,3	26,4	26,8
$2 \cdot 10^5$	0,20	0,46	0,88	1,4	3,1	5,1	9,3	13,9	17,7	18,5	22,0	22,3	24,5	26,6	27,7	28,2
$5 \cdot 10^5$	0,22	0,50	0,94	1,6	3,3	5,5	9,9	14,9	18,9	19,7	23,4	23,7	26,1	28,3	29,5	30,0
10^6	0,23	0,52	0,99	1,6	3,4	5,7	10,4	15,5	19,7	20,6	24,4	24,8	27,3	29,6	30,8	31,3
$2 \cdot 10^6$	0,24	0,55	1,0	1,7	3,6	6,0	10,9	16,2	20,6	21,5	25,5	25,9	28,4	30,9	32,2	32,7
$5 \cdot 10^6$	0,25	0,58	1,1	1,8	3,8	6,4	11,5	17,2	21,8	22,7	26,9	27,3	30,0	32,6	33,9	34,5
10^7	0,26	0,61	1,2	1,9	4,0	6,6	12,0	17,9	22,6	23,6	28,0	28,4	31,2	33,8	35,2	35,8
δ_d													0,869	0,879	0,883	0,886

Продолжение табл. 5.42

Кратность ослабления k	Энергия фотонов, МэВ															Кратность ослабления k
	0,8	0,9	1,0	1,25	1,5	1,75	2,0	2,2	2,75	3,0	4,0	6,0	8,0	10,0		
1,5	2,1	2,2	2,2	2,4	2,5	2,6	2,7	2,7	2,9	2,9	3,0	3,2	3,2	3,1	10,0	1,5
2	3,1	3,2	3,3	3,5	3,8	3,9	4,1	4,2	4,5	4,5	4,6	4,9	4,9	4,8	8,0	2
5	5,9	6,2	6,4	6,9	7,4	7,8	8,2	8,5	9,0	9,1	9,5	9,9	9,9	9,8	5	5
8	7,2	7,5	7,8	8,4	9,1	9,6	10,1	10,4	11,2	11,3	11,9	12,4	12,4	12,3	8	8
10	7,8	8,2	8,5	9,2	9,9	10,4	11,0	11,4	12,2	12,3	12,9	13,6	13,5	13,4	10	10
20	9,5	10,0	10,4	11,3	12,3	12,9	13,7	14,1	15,2	15,4	16,3	17,1	17,1	16,9	20	20
30	10,5	11,1	11,5	12,5	13,6	14,3	15,2	15,7	16,9	17,1	18,4	19,2	19,2	19,0	30	30
40	11,2	11,8	12,3	13,4	14,6	15,3	16,3	16,8	18,1	18,4	19,5	20,5	20,6	20,4	40	40
50	11,8	12,4	12,9	14,1	15,3	16,1	17,1	17,7	19,0	19,3	20,5	21,6	21,7	21,6	50	50
60	12,2	12,9	13,4	14,6	15,9	16,7	17,8	18,3	19,8	20,1	21,3	22,5	22,6	22,5	60	60
80	12,9	13,6	14,2	15,4	16,8	17,7	18,8	19,4	21,0	21,3	22,7	23,9	24,1	23,9	80	80
100	13,4	14,2	14,7	16,1	17,5	18,4	19,6	20,3	21,9	22,2	23,7	25,0	25,1	25,0	100	100
$2 \cdot 10^2$	15,1	15,9	16,5	18,0	19,7	20,7	22,0	22,8	24,7	25,1	26,8	28,4	28,6	28,4	$2 \cdot 10^2$	$2 \cdot 10^2$
$5 \cdot 10^2$	17,1	18,1	18,8	20,6	22,4	23,7	25,2	26,1	28,3	28,8	30,8	32,7	33,1	32,9	$5 \cdot 10^2$	$5 \cdot 10^2$
10^3	18,7	19,7	20,6	22,5	24,5	25,9	27,6	28,6	31,0	31,6	33,8	36,0	36,4	36,2	10^3	10^3
$2 \cdot 10^3$	20,2	21,4	22,3	24,4	26,6	28,1	30,0	31,0	33,7	34,3	36,9	39,2	39,8	39,6	$2 \cdot 10^3$	$2 \cdot 10^3$
$5 \cdot 10^3$	22,2	23,5	24,5	26,8	29,3	30,9	33,0	34,2	37,2	37,9	40,8	43,5	44,1	44,0	$5 \cdot 10^3$	$5 \cdot 10^3$
10^4	23,7	25,1	26,2	28,6	31,3	33,1	35,3	36,0	39,8	40,6	43,7	46,7	47,4	47,3	10^4	10^4
$2 \cdot 10^4$	25,3	26,7	27,8	30,5	33,3	35,2	37,6	39,0	42,4	43,3	46,6	49,9	50,7	50,6	$2 \cdot 10^4$	$2 \cdot 10^4$
$5 \cdot 10^4$	27,2	28,8	30,0	32,9	36,0	38,1	40,7	42,2	45,9	46,8	50,5	54,1	55,0	54,9	$5 \cdot 10^4$	$5 \cdot 10^4$
10^5	28,8	30,4	31,7	34,7	38,0	40,2	43,0	44,6	48,5	53,4	57,2	58,3	58,2	58,2	10^5	10^5
$2 \cdot 10^5$	30,2	31,9	33,3	36,5	40,0	42,4	45,2	46,9	51,1	52,2	56,4	60,4	61,6	61,5	$2 \cdot 10^5$	$2 \cdot 10^5$
$5 \cdot 10^5$	32,2	34,0	35,5	38,9	42,6	45,1	48,2	50,0	54,5	55,6	60,2	64,6	65,9	65,8	$5 \cdot 10^5$	$5 \cdot 10^5$
10^6	33,6	35,5	37,1	40,7	44,6	47,2	50,4	52,3	57,1	58,3	63,0	67,7	72,3	72,3	10^6	10^6
$2 \cdot 10^6$	35,1	37,1	38,7	42,5	46,5	49,3	52,7	54,7	59,6	60,9	65,9	70,8	76,6	76,6	$2 \cdot 10^6$	$2 \cdot 10^6$
$5 \cdot 10^6$	37,0	39,1	40,8	44,8	49,1	52,0	55,6	57,7	63,0	64,3	69,7	74,9	76,6	76,6	$5 \cdot 10^6$	$5 \cdot 10^6$
10^7	38,5	40,6	42,5	46,6	51,1	54,1	57,9	60,1	65,6	67,0	72,5	78,0	79,8	79,8	10^7	10^7
δ_d	0,893	0,899	0,903	0,911	0,919	0,924	0,929	0,932	0,940	0,943	0,956	0,973	0,983	0,987	δ_d	δ_d

* Значение получено экстраполяцией по толщине.

Таблица 5.43

Толщина защиты из свинца, см ($\rho = 11,34 \text{ г/см}^3$)

Кратность ослабле- ния k	Энергия фотонов, МэВ														Кратность ослабле- ния k	
	0,1	0,12	0,14	0,145	0,16	0,18	0,2	0,279	0,3	0,4	0,412	0,5	0,6	0,662		0,7
1,5	0,02	0,02	0,03	0,03	0,03	0,03	0,05	0,11	0,12	0,21	0,22	0,32	0,39	0,45	0,48	0,58
2	0,03	0,03	0,04	0,04	0,05	0,05	0,08	0,17	0,19	0,34	0,36	0,52	0,65	0,75	0,80	0,97
5	0,06	0,06	0,08	0,09	0,10	0,11	0,17	0,38	0,42	0,76	0,80	1,1	1,5	1,7	1,8	2,1
8	0,08	0,08	0,10	0,11	0,13	0,13	0,21	0,49	0,54	0,97	1,0	1,4	1,9	2,1	2,3	2,7
10	0,08	0,09	0,11	0,12	0,14	0,15	0,24	0,54	0,59	1,1	1,1	1,6	2,0	2,3	2,5	3,0
20	0,11	0,11	0,14	0,15	0,18	0,19	0,30	0,69	0,76	1,4	1,4	2,0	2,6	3,0	3,2	3,8
30	0,12	0,12	0,16	0,17	0,20	0,21	0,34	0,78	0,86	1,5	1,6	2,3	3,0	3,4	3,6	4,3
40	0,14	0,14	0,17	0,18	0,22	0,23	0,37	0,85	0,93	1,7	1,8	2,5	3,2	3,6	3,8	4,6
50	0,14	0,14	0,18	0,19	0,23	0,24	0,39	0,90	0,98	1,8	1,9	2,6	3,4	3,8	4,0	4,8
60	0,15	0,15	0,18	0,20	0,24	0,25	0,40	0,94	1,0	1,8	1,9	2,7	3,5	4,0	4,2	5,0
80	0,16	0,16	0,19	0,21	0,25	0,27	0,43	1,0	1,1	2,0	2,1	2,9	3,7	4,2	4,5	5,4
100	0,17	0,17	0,20	0,22	0,26	0,28	0,45	1,0	1,2	2,1	2,2	3,0	3,9	4,4	4,7	5,6
2·10 ²	0,20	0,19	0,23	0,25	0,30	0,32	0,52	1,2	1,3	2,4	2,5	3,5	4,5	5,1	5,4	6,4
5·10 ²	0,24	0,23	0,27	0,29	0,35	0,37	0,60	1,4	1,5	2,7	2,9	4,0	5,2	5,9	6,2	7,4
10 ³	0,28	0,26	0,30	0,32	0,39	0,41	0,67	1,6	1,7	3,0	3,2	4,4	5,7	6,5	6,9	8,2
2·10 ³	0,31	0,28	0,32	0,35	0,42	0,45	0,74	1,7	1,9	3,3	3,5	4,9	6,3	7,1	7,6	9,0
5·10 ³	0,35	0,32	0,36	0,39	0,47	0,50	0,82	1,9	2,1	3,7	3,9	5,4	7,0	8,0	8,4	10,0
10 ⁴	0,38	0,35	0,39	0,42	0,51	0,54	0,89	2,1	2,3	4,0	4,2	5,8	7,6	8,6	9,1	10,8
2·10 ⁴	0,42	0,38	0,42	0,45	0,55	0,58	0,95	2,2	2,4	4,3	4,5	6,3	8,1	9,2	9,7	11,5
5·10 ⁴	0,46	0,42	0,46	0,49	0,59	0,64	1,0	2,4	2,6	4,7	4,9	6,8	8,8	10,0	10,6	12,5
10 ⁵	0,50	0,46	0,49	0,52	0,63	0,68	1,1	2,6	2,8	5,0	5,2	7,2	9,3	10,6	11,2	13,3
2·10 ⁵	0,53	0,49	0,52	0,55	0,67	0,72	1,2	2,7	3,0	5,3	5,5	7,7	9,9	11,2	11,8	14,1
5·10 ⁵	0,58	0,53	0,56	0,60	0,72	0,77	1,2	2,9	3,2	5,6	5,9	8,2	10,6	12,0	12,7	15,1
10 ⁶	0,61	0,56	0,59	0,63	0,75	0,81	1,3	3,1	3,4	5,9	6,2	8,6	11,1	12,6	13,3	15,8
2·10 ⁶	0,65	0,59	0,62	0,66	0,79	0,85	1,4	3,2	3,5	6,2	6,6	9,1	11,6	13,2	14,0	16,6
5·10 ⁶	0,69*	0,64	0,66	0,71	0,84	0,90	1,5	3,4	3,7	6,6	7,0	9,6	12,4	14,0	14,8	17,6
10 ⁷	0,72*	0,69	0,70	0,74	0,87	0,94	1,5	3,6	3,9	6,9	7,3	10,0	12,9	14,6	15,4	18,3
δ _д	0,985	0,986	0,986	0,987	0,988	0,989	0,989	0,989	0,990	0,990	0,990	0,993	0,994	0,984	0,984	0,984

Продолжение табл. 5.43

Кратность ослаб- ления k	Энергия фотонов, МэВ														Кратность ослаб- ления k	
	0,9	1,0	1,25	1,5	1,75	2,0	2,2	2,75	3,0	4,0	6,0	8,0	10,0	10,0		
1,5	0,66	0,74	0,89	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,3	1,3	1,5
2	1,1	1,2	1,5	1,7	1,9	2,0	2,1	2,2	2,2	2,2	2,2	2,2	2,1	2,1	2,1	2
5	2,4	2,7	3,2	3,7	4,0	4,4	4,4	4,6	4,7	4,7	4,7	4,7	4,5	4,4	4,3	5
8	3,1	3,4	4,1	4,7	5,1	5,5	5,6	5,8	5,9	5,9	5,9	5,9	5,6	5,5	5,5	8
10	3,4	3,8	4,5	5,2	5,6	6,0	6,1	6,4	6,5	6,5	6,5	6,2	6,2	6,1	6,0	10
20	4,3	4,8	5,7	6,6	7,1	7,6	7,8	8,2	8,3	8,2	8,2	7,9	7,9	7,7	7,7	20
30	4,8	5,4	6,4	7,4	8,0	8,6	8,7	9,2	9,3	9,3	9,3	8,9	8,9	8,7	8,7	30
40	5,2	5,8	6,9	8,0	8,6	9,2	9,4	9,9	10,0	10,0	10,0	9,6	9,4	9,4	9,4	40
50	5,5	6,1	7,3	8,4	9,1	9,7	9,9	10,4	10,6	10,6	10,6	10,1	9,9	9,9	9,9	50
60	5,7	6,4	7,6	8,7	9,4	10,1	10,3	10,9	11,0	11,0	11,0	10,6	10,4	10,4	10,3	60
80	6,1	6,8	8,1	9,3	10,0	10,8	11,0	11,6	11,8	11,8	11,7	11,3	11,1	11,0	11,0	80
100	6,4	7,1	8,4	9,7	10,5	11,3	11,5	12,1	12,3	12,3	12,3	11,8	11,6	11,6	11,6	100
2·10 ²	7,3	8,1	9,6	11,1	12,0	12,8	13,1	13,8	14,0	14,0	14,0	13,5	13,3	13,2	13,2	2·10 ²
5·10 ²	9,3	10,4	12,3	14,1	15,3	16,4	16,7	17,6	17,9	17,9	17,9	17,4	17,1	17,1	17,1	5·10 ²
10 ³	9,3	10,4	12,3	14,1	15,3	16,4	16,7	17,6	17,9	17,9	17,9	17,4	17,1	17,1	17,1	10 ³
2·10 ³	10,2	11,3	13,4	15,5	16,7	17,9	18,2	19,2	19,6	19,6	19,6	19,0	18,7	18,7	18,7	2·10 ³
5·10 ³	11,3	12,6	14,9	17,2	18,5	19,8	20,3	21,4	21,8	21,8	21,8	21,2	20,9	20,9	20,9	5·10 ³
10 ⁴	12,2	13,5	16,0	18,5	19,9	21,3	22,8	23,8	24,6	25,1	25,1	24,5	24,2	24,1	24,1	2·10 ⁴
2·10 ⁴	14,2	15,7	18,6	21,4	23,1	24,7	26,2	26,7	27,2	27,2	27,2	26,7	26,3	26,3	26,3	5·10 ⁴
5·10 ⁴	15,0	16,7	19,7	22,7	24,5	26,2	26,8	28,3	28,9	29,0	29,0	28,3	28,0	27,9	27,9	2·10 ⁵
10 ⁵	15,9	17,6	20,9	24,0	25,8	27,7	28,3	29,9	30,5	30,6	30,6	29,6	29,6	29,6	29,6	5·10 ⁵
2·10 ⁵	17,0	18,9	22,3	25,7	27,7	29,6	30,2	32,0	32,6	32,8	32,8	32,1	31,7	31,6	31,6	2·10 ⁵
5·10 ⁵	17,9	19,8	23,4	27,0	29,0	31,1	31,7	33,5	34,2	34,4	34,4	33,3	33,3	33,3	33,3	5·10 ⁵
10 ⁶	18,7	20,8	24,5	28,2	30,4	32,5	33,2	35,1	35,8	36,0	36,0	35,3	34,9	34,9	34,9	2·10 ⁶
2·10 ⁶	19,8	22,0	26,0	29,9	32,2	34,4	35,1	37,2	37,9	38,2	38,2	37,5	37,1	37,0	37,0	5·10 ⁶
5·10 ⁶	20,7	22,9	27,1	31,1	33,5	35,8	36,6	38,7	39,5	39,8	39,8	39,1	38,7	38,6	38,6	10 ⁷
δ _д	0,985	0,986	0,986	0,987	0,988	0,989	0,989	0,989	0,990	0,990	0,990	0,993	0,994	0,984	0,984	δ _д

* Значение получено экстраполяцией по толщине.

Толщина защиты из вольфрама, см ($\rho = 19,3 \text{ г/см}^3$)

Кратность ослаб- ления k	Энергия фотонов, МэВ																Кратность ослаб- ления k
	0,08	0,1	0,12	0,14	0,145	0,16	0,18	0,2	0,279	0,3	0,4	0,412	0,5	0,6	0,662	0,7	
1,5	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02	0,03	0,04	0,07	0,09	0,16	0,17	0,23	0,35*	0,50*	0,50*	1,5
2	0,02	0,02	0,02	0,03	0,03	0,04	0,04	0,06	0,12	0,14	0,25	0,27	0,37	0,46*	0,60*	0,60*	2
5	0,03	0,03	0,04	0,05	0,06	0,08	0,10	0,12	0,26	0,32	0,56	0,59	0,81	1,0	1,2	1,2	5
8	0,04	0,04	0,05	0,07	0,08	0,10	0,12	0,16	0,33	0,40	0,71	0,75	1,0	1,3	1,5	1,5	8
10	0,04	0,04	0,06	0,07	0,08	0,11	0,13	0,18	0,36	0,44	0,78	0,82	1,1	1,4	1,6	1,7	10
20	0,05	0,06	0,07	0,09	0,10	0,14	0,17	0,22	0,47	0,57	0,99	1,0	1,4	1,8	2,1	2,2	20
30	0,06	0,06	0,08	0,10	0,12	0,15	0,20	0,25	0,53	0,64	1,1	1,2	1,6	2,1	2,3	2,4	30
40	0,06	0,07	0,08	0,11	0,13	0,16	0,21	0,28	0,57	0,70	1,1	1,3	1,7	2,2	2,5	2,6	40
50	0,06	0,07	0,09	0,12	0,14	0,17	0,22	0,29	0,61	0,74	1,3	1,4	1,8	2,3	2,6	2,8	50
60	0,07	0,07	0,09	0,12	0,14	0,18	0,23	0,30	0,63	0,77	1,3	1,4	1,9	2,4	2,7	2,9	60
80	0,07	0,08	0,10	0,13	0,15	0,19	0,25	0,32	0,68	0,82	1,4	1,5	2,0	2,6	2,9	3,0	80
100	0,08	0,08	0,10	0,14	0,16	0,20	0,26	0,34	0,71	0,86	1,5	1,6	2,1	2,7	3,0	3,2	100
$2 \cdot 10^2$	0,09	0,09	0,12	0,16	0,18	0,23	0,30	0,39	0,81	0,98	1,7	1,8	2,4	3,1	3,5	3,6	$2 \cdot 10^2$
$5 \cdot 10^2$	0,11	0,11	0,13	0,18	0,21	0,27	0,35	0,46	0,95	1,2	2,0	2,1	2,8	3,6	4,0	4,2	$5 \cdot 10^2$
10^3	0,12	0,12	0,15	0,20	0,23	0,30	0,39	0,50	1,0	1,3	2,2	2,3	3,1	4,0	4,4	4,6	10^3
$2 \cdot 10^3$	0,14	0,14	0,16	0,22	0,25	0,33	0,42	0,55	1,2	1,4	2,4	2,5	3,4	4,3	4,9	5,1	$2 \cdot 10^3$
$5 \cdot 10^3$	0,16	0,16	0,18	0,25	0,28	0,37	0,47	0,62	1,3	1,6	2,7	2,8	3,8	4,8	5,4	5,7	$5 \cdot 10^3$
10^4	0,17	0,17	0,19	0,27	0,30	0,40	0,51	0,67	1,4	1,7	2,9	3,0	4,1	5,2	5,8	6,1	10^4
$2 \cdot 10^4$	0,19	0,18	0,21	0,29	0,33	0,42	0,55	0,72	1,5	1,8	3,1	3,3	4,4	5,6	6,2	6,5	$2 \cdot 10^4$
$5 \cdot 10^4$	0,21	0,20	0,23	0,32	0,36	0,46	0,60	0,78	1,6	2,0	3,4	3,6	4,7	6,0	6,8	7,1	$5 \cdot 10^4$
10^5	0,22	0,22	0,24	0,33	0,38	0,50	0,64	0,83	1,7	2,1	3,6	3,8	5,0	6,4	7,2	7,5	10^5
$2 \cdot 10^5$	0,24	0,23	0,25	0,35	0,40	0,52	0,68	0,88	1,8	2,2	3,8	4,0	5,3	6,8	7,6	7,9	$2 \cdot 10^5$
$5 \cdot 10^5$	0,26	0,25	0,27	0,38	0,43	0,56	0,73	0,95	2,0	2,4	4,0	4,3	5,7	7,2	8,1	8,5	$5 \cdot 10^5$
10^6	0,27	0,27	0,29	0,40	0,45	0,59	0,76	1,0	2,1	2,5	4,3	4,5	6,0	7,6	8,5	8,9	10^6
$2 \cdot 10^6$	0,29*	0,28	0,30	0,42	0,47	0,62	0,80	1,0	2,2	2,6	4,5	4,7	6,3	8,0	8,9	9,3	$2 \cdot 10^6$
$5 \cdot 10^6$	0,31*	0,30	0,32	0,44	0,50	0,66	0,85	1,1	2,3	2,8	4,7	5,0	6,7	8,4	9,4	9,9	$5 \cdot 10^6$
10^7	0,32*	0,32	0,33	0,46	0,52	0,68	0,89	1,2	2,4	2,9	4,9	5,2	6,9	8,8	9,8	10,3	10^7

Продолжение табл. 5.44

Кратность ослаб- ления k	Энергия фотонов, МэВ																Кратность ослаб- ления k
	0,8	0,9	1,0	1,25	1,5	1,75	2,0	2,2	2,75	3,0	4,0	6,0	8,0	10,0			
1,5	0,55*	0,65*	0,70*	0,80*	0,90*	1,0*	1,1*	1,1*	1,1*	1,1*	1,1*	1,1*	0,90*	0,80*	0,70*	1,5	
2	0,68	0,77	0,88	1,0	1,1	1,2	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,1*	1,0*	0,90*	2	
5	1,4	1,6	1,8	2,1	2,4	2,6	2,7	2,8	2,9	2,9	2,8	2,7	2,4	2,2	2,0	5	
8	1,8	2,0	2,3	2,7	3,0	3,2	3,4	3,6	3,6	3,6	3,6	3,5	3,2	2,9	2,6	8	
10	2,0	2,2	2,5	2,9	3,3	3,5	3,8	3,9	4,0	4,0	4,0	3,9	3,5	3,2	2,9	10	
20	2,5	2,8	3,2	3,7	4,2	4,5	4,8	5,0	5,1	5,1	5,0	4,9	4,6	4,2	3,8	20	
30	2,8	3,2	3,6	4,2	4,7	5,0	5,4	5,6	5,7	5,7	5,6	5,2	4,7	4,3	3,9	30	
40	3,1	3,4	3,8	4,5	5,0	5,4	5,8	6,0	6,1	6,1	6,2	6,1	5,6	5,1	4,7	40	
50	3,2	3,6	4,0	4,7	5,3	5,7	6,1	6,3	6,4	6,5	6,4	6,0	5,4	5,0	4,7	50	
60	3,4	3,8	4,2	4,9	5,5	6,0	6,3	6,6	6,7	6,8	6,7	6,2	5,7	5,2	5,2	60	
80	3,6	4,0	4,5	5,2	5,8	6,3	6,7	7,0	7,2	7,2	7,2	6,7	6,1	5,6	5,6	80	
100	3,8	4,2	4,7	5,4	6,1	6,6	7,0	7,3	7,5	7,5	7,5	7,0	6,4	5,9	5,9	100	
$2 \cdot 10^2$	4,3	4,7	5,3	6,2	7,0	7,5	8,0	8,3	8,5	8,5	8,6	8,6	8,1	7,4	6,8	$2 \cdot 10^2$	
$5 \cdot 10^2$	4,9	5,5	6,1	7,2	8,0	8,7	9,2	9,6	9,9	10,9	10,0	10,0	9,5	8,8	8,0	$5 \cdot 10^2$	
10^3	5,4	6,0	6,8	7,9	8,8	9,6	10,1	10,6	10,6	11,5	11,0	11,0	10,5	9,8	9,0	10^3	
$2 \cdot 10^3$	6,0	6,6	7,4	8,6	9,6	10,4	11,0	11,5	11,9	12,8	12,0	12,0	11,6	10,8	10,0	$2 \cdot 10^3$	
$5 \cdot 10^3$	6,6	7,3	8,2	9,5	10,7	11,5	12,2	12,8	13,7	14,2	13,4	13,5	13,0	12,1	11,2	$5 \cdot 10^3$	
10^4	7,1	7,9	8,8	10,2	11,5	12,4	13,1	13,7	14,7	15,2	14,4	14,5	14,1	13,1	12,2	10^4	
$2 \cdot 10^4$	7,6	8,4	9,4	10,9	12,3	13,3	14,0	14,7	15,9	16,5	15,4	15,5	15,1	14,2	13,2	$2 \cdot 10^4$	
$5 \cdot 10^4$	8,2	9,1	10,2	11,8	13,3	14,4	15,2	15,9	17,1	17,8	16,7	16,9	16,5	15,5	14,5	$5 \cdot 10^4$	
10^5	8,7	9,7	10,8	12,5	14,1	15,2	16,2	16,9	18,5	18,7	17,7	17,9	17,6	16,6	15,5	10^5	
$2 \cdot 10^5$	9,2	10,2	11,4	13,2	14,9	16,1	17,1	17,8	19,8	18,5	18,7	19,0	18,6	17,6	16,5	$2 \cdot 10^5$	
$5 \cdot 10^5$	9,9	10,9	12,2	14,2	15,9	17,2	18,3	19,1	20,7	19,8	20,0	20,3	20,0	19,0	17,8	$5 \cdot 10^5$	
10^6	10,4	11,4	12,7	14,9	16,7	18,1	19,1	19,9	21,7	20,9	20,9	21,3	21,0	20,0	18,8	10^6	
$2 \cdot 10^6$	10,8	12,0	13,3	15,5	17,5	18,9	20,0	20,9	22,1	21,9	22,3	22,3	22,1	21,0	19,7	$2 \cdot 10^6$	
$5 \cdot 10^6$	11,5	12,7	14,1	16,4	18,5	20,0	21,2	22,1	22,9	22,9	23,2	23,7	23,4	22,4	21,0	$5 \cdot 10^6$	
10^7	12,0	13,2	14,7	17,1	19,2	20,8	22,1	23,1	23,9	23,9	24,2	24,7	24,5	23,4	22,0	10^7	

* Значение получено экстраполяцией по толщине.

Толщина защиты из урана, см ($\rho = 18,7 \text{ г/см}^3$)

Кратность ослаб- ления k	Энергия фотонов, МэВ														Кратность ослаб- ления k	
	0,12	0,14	0,145	0,16	0,18	0,2	0,279	0,3	0,4	0,412	0,5	0,6	0,662	0,7		0,8
1,5	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,03	0,05	0,06	0,10	0,10	0,15	0,23*	0,30*	0,40*	0,50*	0,65*
2	0,03	0,03	0,03	0,04	0,04	0,04	0,08	0,09	0,16	0,17	0,24	0,30*	0,40*	0,50*	0,65*	0,75*
5	0,06	0,06	0,06	0,07	0,07	0,09	0,17	0,20	0,35	0,37	0,54	0,73	0,83	0,90	1,1	1,3
8	0,07	0,07	0,07	0,08	0,09	0,11	0,21	0,25	0,45	0,48	0,68	0,93	1,0	1,1	1,4	1,7
10	0,08	0,08	0,08	0,09	0,10	0,12	0,23	0,28	0,50	0,52	0,75	1,0	1,2	1,3	1,5	1,8
20	0,11	0,10	0,10	0,11	0,12	0,15	0,30	0,36	0,64	0,67	0,97	1,3	1,5	1,6	2,0	2,3
30	0,12	0,11	0,11	0,12	0,14	0,17	0,34	0,40	0,72	0,76	1,1	1,5	1,7	1,8	2,2	2,6
40	0,13	0,12	0,12	0,13	0,15	0,18	0,36	0,44	0,78	0,82	1,2	1,6	1,8	2,0	2,4	2,8
50	0,14	0,13	0,13	0,14	0,16	0,19	0,38	0,46	0,83	0,87	1,2	1,7	1,9	2,1	2,5	3,0
60	0,15	0,13	0,13	0,15	0,16	0,20	0,40	0,48	0,86	0,91	1,3	1,8	2,0	2,2	2,6	3,1
80	0,16	0,14	0,14	0,16	0,17	0,21	0,43	0,51	0,92	0,97	1,4	1,9	2,1	2,3	2,8	3,3
100	0,17	0,15	0,15	0,16	0,18	0,22	0,45	0,54	0,97	1,0	1,5	2,0	2,2	2,4	2,9	3,5
$2 \cdot 10^2$	0,20	0,17	0,17	0,18	0,20	0,25	0,52	0,62	1,1	1,2	1,7	2,2	2,5	2,8	3,4	4,0
$5 \cdot 10^2$	0,24	0,21	0,21	0,22	0,24	0,29	0,60	0,72	1,3	1,4	1,5	2,0	2,6	3,0	3,2	3,9
10^3	0,27	0,23	0,24	0,24	0,26	0,32	0,67	0,80	1,4	1,5	2,2	2,9	3,3	3,6	4,3	5,1
$2 \cdot 10^3$	0,30	0,26	0,26	0,26	0,29	0,36	0,73	0,88	1,6	1,6	2,4	3,2	3,6	3,9	4,7	5,5
$5 \cdot 10^3$	0,34	0,30	0,30	0,30	0,32	0,40	0,82	0,98	1,8	1,8	2,6	3,5	4,0	4,3	5,3	6,2
10^4	0,37	0,32	0,33	0,32	0,35	0,43	0,88	1,1	1,9	2,0	2,8	3,8	4,3	4,7	5,7	6,6
$2 \cdot 10^4$	0,40	0,35	0,36	0,35	0,37	0,46	0,95	1,1	2,0	2,1	3,0	4,1	4,6	5,0	6,1	7,1
$5 \cdot 10^4$	0,45	0,39	0,40	0,38	0,41	0,50	1,0	1,2	2,2	2,3	3,3	4,5	5,0	5,4	6,6	7,7
10^5	0,48	0,42	0,43	0,41	0,43	0,53	1,1	1,3	2,4	2,5	3,5	4,7	5,3	5,8	7,0	8,2
$2 \cdot 10^5$	0,51	0,45	0,46	0,44	0,46	0,56	1,2	1,4	2,5	2,6	3,7	5,0	5,6	6,1	7,4	8,7
$5 \cdot 10^5$	0,56	0,49	0,50	0,47	0,49	0,60	1,2	1,5	2,7	2,8	4,0	5,4	6,0	6,6	7,9	9,3
10^6	0,58*	0,52	0,53	0,50	0,52	0,63	1,3	1,6	2,8	3,0	4,2	5,6	6,4	6,9	8,3	9,8
$2 \cdot 10^6$	0,61*	0,55	0,56	0,53	0,54	0,66	1,4	1,6	3,0	3,1	4,4	5,9	6,7	7,2	8,7	10,2
$5 \cdot 10^6$	0,64*	0,59	0,60	0,57	0,58	0,70	1,5	1,8	3,1	3,3	4,7	6,3	7,1	7,7	9,3	10,8
10^7	0,67*	0,62	0,63	0,60	0,61	0,73	1,5	1,8	3,3	3,4	4,9	6,6	7,4	8,0	9,7	11,3

Продолжение табл. 5.45

Кратность ослаб- ления k	Энергия фотонов, МэВ														Кратность ослаб- ления k
	1,0	1,25	1,5	1,75	2,0	2,2	2,75	3,0	4,0	6,0	8,0	10,0			
1,5	0,75*	1,1*	1,3*	1,4*	1,5*	1,6*	1,6*	1,7*	1,7*	1,6*	1,5*	1,4*	1,3*	1,0,0	1,5
2	0,90*	1,2*	1,4*	1,5*	1,6*	1,6*	1,8*	1,8*	1,8*	1,7*	1,6*	1,5*	1,4*	1,0,0	2
5	1,5	1,8	2,1	2,2	2,4	2,4	2,5	2,6	2,6	2,5	2,2	2,0	1,9	1,5	5
8	1,8	2,2	2,6	2,8	3,1	3,1	3,2	3,3	3,3	3,2	2,9	2,6	2,4	1,9	8
10	2,0	2,4	2,9	3,1	3,4	3,4	3,5	3,6	3,6	3,5	3,2	2,9	2,7	10	10
20	2,6	3,1	3,7	4,0	4,3	4,3	4,5	4,7	4,7	4,6	4,2	3,8	3,5	20	20
30	2,9	3,5	4,2	4,5	4,8	4,8	5,0	5,2	5,2	5,1	4,8	4,4	4,0	30	30
40	3,1	3,8	4,5	4,8	5,2	5,2	5,4	5,7	5,7	5,6	5,2	4,7	4,4	40	40
50	3,3	4,0	4,7	5,1	5,5	5,5	5,7	6,0	6,0	5,9	5,5	5,0	4,6	50	50
60	3,4	4,1	4,9	5,3	5,7	5,7	6,0	6,2	6,2	6,1	5,7	5,2	4,8	60	60
80	3,7	4,4	5,2	5,6	6,1	6,1	6,4	6,6	6,6	6,6	6,1	5,6	5,2	80	80
$2 \cdot 10^2$	3,8	4,6	5,5	5,9	6,4	6,4	6,6	6,6	6,6	6,6	6,1	5,6	5,2	100	100
$5 \cdot 10^2$	4,4	5,3	6,3	6,7	7,3	7,3	7,6	8,0	8,0	7,9	7,4	6,8	6,3	$2 \cdot 10^2$	$2 \cdot 10^2$
10^3	5,1	6,1	7,3	7,8	8,4	8,4	8,8	9,2	9,2	9,2	8,7	8,0	7,4	$5 \cdot 10^2$	$5 \cdot 10^2$
$2 \cdot 10^3$	5,6	6,7	8,0	8,6	9,3	9,3	9,7	10,2	10,2	10,2	9,7	9,0	8,3	10^3	10^3
$5 \cdot 10^3$	6,8	8,2	9,7	10,4	11,3	11,3	11,8	12,4	12,4	11,1	10,6	9,9	9,2	$2 \cdot 10^3$	$2 \cdot 10^3$
10^4	7,3	8,8	10,5	11,2	12,0	12,0	12,7	13,4	13,4	12,3	12,4	11,1	10,4	$5 \cdot 10^3$	$5 \cdot 10^3$
$2 \cdot 10^4$	7,8	9,4	11,2	12,0	13,0	13,0	13,6	14,3	14,3	13,3	13,4	12,1	11,3	10^4	10^4
$5 \cdot 10^4$	8,5	10,2	12,2	13,0	14,1	14,1	14,7	15,5	15,5	14,2	14,3	13,0	12,2	$2 \cdot 10^4$	$2 \cdot 10^4$
10^5	9,0	10,9	12,9	13,8	14,9	14,9	15,6	16,5	16,5	15,4	15,6	14,3	13,4	$5 \cdot 10^4$	$5 \cdot 10^4$
$2 \cdot 10^5$	9,5	11,5	13,6	14,6	15,8	15,8	16,5	17,4	17,4	16,4	16,6	15,2	14,3	10^5	10^5
$5 \cdot 10^5$	10,2	12,3	14,6	15,6	16,9	16,9	17,7	18,7	18,7	17,3	17,5	16,2	15,3	$2 \cdot 10^5$	$2 \cdot 10^5$
10^6	10,7	12,9	15,3	16,4	17,7	17,7	18,5	19,6	19,6	18,5	18,8	17,4	16,5	$5 \cdot 10^5$	$5 \cdot 10^5$
$2 \cdot 10^6$	11,2	13,5	16,1	17,2	18,6	18,6	19,4	20,5	20,5	19,4	19,7	18,4	17,4	10^6	10^6
$5 \cdot 10^6$	11,9	14,3	17,0	18,2	19,6	19,6	20,6	21,7	21,7	20,4	20,7	19,4	18,3	$2 \cdot 10^6$	$2 \cdot 10^6$
10^7	12,4	14,9	17,7	19,0	20,5	20,5	21,4	22,6	22,6	21,9	22,9	20,6	19,5	$5 \cdot 10^6$	$5 \cdot 10^6$
														10^7	10^7

требуется увеличить толщину защиты Δd , чтобы сохранились прежние предельно допустимые дозы облучения персонала на рабочем месте. Зависимостью фактора накопления от взаимного расположения источника, защиты, детектора пренебречь.

Решение. По универсальным таблицам для $\bar{E}_0=1,25$ МэВ определяем, что прежняя толщина защиты $d_1=12,3$ см обеспечивала кратность ослабления $k_1=10^3$. Изменившиеся условия работы требуют увеличения кратности ослабления в $k=lp=2 \cdot 10=20$ раз. Следовательно, новая требуемая кратность ослабления $k_2=k_1k=10^3 \cdot 20=2 \cdot 10^4$. По универсальным таблицам для $\bar{E}_0=1,25$ МэВ и $k_2=2 \cdot 10^4$ определяем требуемую толщину защиты $d_2=17,2$ см. Таким образом, толщина защиты должна быть увеличена на $\Delta d=d_2-d_1=17,2-12,3=4,9$ см. Заметим, что поправку на барьерность среды не учли в связи с ее малостью ($\delta_a=0,986$).

§ 5.6. ЗАЩИТА ОТ ПЛОСКИХ И ТОЧЕЧНЫХ ИЗОТРОПНЫХ ИСТОЧНИКОВ ПО СЛОЯМ ОСЛАБЛЕНИЯ

Слой ослабления $\Delta_{1/k}$ показывает толщину защиты, которая ослабляет дозу излучения (плотность потока энергии, плотность потока частиц и т. д.) в k раз. Наиболее широко в расчетах применяют слой половинного $\Delta_{1/2}$ и десятичного $\Delta_{1/10}$ ослабления. Толщине защиты $\Delta_{1/2}$ соответствует кратность ослабления излучения, равная 2, толщине $\Delta_{1/10}$ — равная 10.

Если пользоваться для расчетов защиты значением слоев половинного ослабления $\Delta_{1/2}$, то для требуемой кратности ослабления излучения защитой k можно определить необходимое число слоев половинного ослабления n из выражения

$$k=2^n. \quad (5.75)$$

Соотношения между значениями k и n приведены в табл. 5.46. Тогда толщина защиты

$$d \approx \Delta_{1/2} n. \quad (5.76)$$

Такая методика расчета, часто используемая для оценок защиты, является приближенной, так как значение $\Delta_{1/2}$ в геометрии широкого пучка изменяется для данной энергии фотонов источника и материала защиты в зависимости от толщины защиты, пропорциональной кратности ослабления (рис. 5.12).

Таблица 5.46

Соотношение между числом слоев половинного ослабления n и кратностью ослабления излучения защитой k^* .

n	k	n	k	n	k	n	k
1	2	2,58	6	3,32	10	7	128
1,58	3	2,81	7	4	16	8	256
2	4	3	8	5	32	9	512
2,32	5	3,17	9	6	64	10	1024

* Для кратностей, больших 10^3 , удобно выделять сомножителем кратность ослабления 10^3 , для которой требуемая толщина защиты d известна: $d \approx 10\Delta_{1/2}$. Например, для $k=64\ 000=64 \cdot 10^3 \approx 2^6 \cdot 2^{10}$ требуется $n \approx 6+10=16$ слоев половинного ослабления.

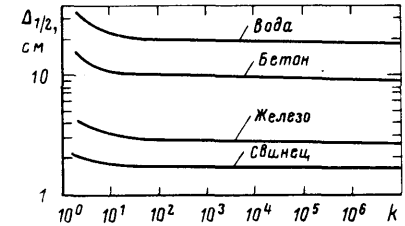


Рис. 5.12. Зависимость значения слоя половинного ослабления от кратности ослабления излучения (по поглощенной дозе в воздухе) защитой из различных материалов (бесконечная геометрия) для точечного изотропного источника фотонов с энергией $E_0=3$ МэВ

Следующий пример иллюстрирует приближенность расчетов по значениям $\Delta_{1/2}$.

Пример. Рассчитать защиту из воды в бесконечной геометрии ($\rho=1,0$ г/см³), ослабляющую по поглощенной дозе в воздухе излучение точечного изотропного источника фотонов с энергией 3 МэВ в 2000 раз.

Решение. Из формулы (5.75) определяем для данной задачи $n \approx 11$. Из рис. 5.12 видно, что значение $\Delta_{1/2}$ в зависимости от k уменьшается. Так при $k=2$ $\Delta_{1/2}=34$ см, при $k=10$ $\Delta_{1/2}=23$ см, при $k=1000$ $\Delta_{1/2}=19$ см. Для указанных значений $\Delta_{1/2}$ по формуле (5.76) вычисляем значения d , равные 374, 253, 209 см соответственно. Точное решение задачи получаем из универсальных таблиц: $d=246$ см.

С хорошей точностью защиту можно рассчитать, если учесть изменение значения слоя ослабления с толщиной защиты. Учесть изменение значения слоя ослабления от толщины защиты при $k \leq 10^3$ удобно, используя значения слоев ослабления $\Delta_{1/10}$, $\Delta_{1/100}$, $\Delta_{1/1000}$. При этом следует иметь в виду, что начиная с толщины защиты, соответствующей кратности ослабления $k > 10^3$, значение слоя десятичного ослабления практически не изменяется с толщиной среды и может быть принято постоянным и равным асимптотическому значению $\Delta_{1/10}^{ac}$.

Если $k=l \cdot 10^m$ ($1 \leq l \leq 10$, m — целое положительное число), толщину защиты с хорошей точностью можно рассчитать по формулам:

$$\text{при } m=0 \quad d = \Delta_{1/10} \xi, \quad (5.77)$$

$$\text{при } m=1 \quad d = \Delta_{1/10} + (\Delta_{1/100} - \Delta_{1/10}) \xi, \quad (5.78)$$

$$\text{при } m=2 \quad d = \Delta_{1/100} + (\Delta_{1/1000} - \Delta_{1/100}) \xi, \quad (5.79)$$

$$\text{при } m \geq 3 \quad d = \Delta_{1/1000} + \Delta_{1/10}^{ac} (m-3) + \Delta_{1/10}^{ac} \xi, \quad (5.80)$$

где ξ — коэффициент, связывающий слой $\Delta_{1/10}$ со слоем $\Delta_{1/l}$ ослабляющим излучение в l раз; $\Delta_{1/l} = \Delta_{1/10} \xi$; значения $\xi = \ln l / 2,3$ приведены в табл. 5.47.

Таблица 5.47

Значения ξ

l	ξ	l	ξ	l	ξ	l	ξ	l	ξ	l	ξ
1,5	0,176	3,0	0,477	4,5	0,653	6,0	0,778	7,5	0,875	9,0	0,954
2,0	0,301	3,5	0,544	5,0	0,699	6,5	0,813	8,0	0,903	9,5	0,978
2,5	0,398	4,0	0,602	5,5	0,740	7,0	0,845	8,5	0,929	10,0	1,00

Таблица 5.48

Значения $\Delta_{1/10}$, $\Delta_{1/100}$, $\Delta_{1/1000}$, $\Delta_{1/10}^{ac}$, г/см², для различных материалов для плоского изотропного источника фотонов при измерении дозы в барьерной геометрии [128]

E_0 , МэВ	$\Delta_{1/10}$	$\Delta_{1/100}$	$\Delta_{1/1000}$	$\Delta_{1/10}^{ac}$	$\Delta_{1/10}$	$\Delta_{1/100}$	$\Delta_{1/1000}$	$\Delta_{1/10}^{ac}$
Углерод (графит)				Вода				
$Z=6; n_s=3,01 \cdot 10^{23} \text{ г}^{-1}$				$\bar{Z}=6,6; n_s=3,34 \cdot 10^{23} \text{ г}^{-1}$				
0,625	34	70	104	33,3	29	60	91	30,0
1,0	37	80	121	41,1	33	70	107	37,1
1,5	43	91	140	47,8	37	81	124	42,8
2,5	51	112	172	60,0	45	99	153	53,8
4,0	62	136	211	76,0	54	120	187	67,7
6,0	72	160	250	91,5	63	142	222	81,7
8,075	79	178	281	103,7	69	157	248	92,3
Натрий				Обычный бетон				
$Z=11; n_s=2,88 \cdot 10^{23} \text{ г}^{-1}$				$\bar{Z}=12,0; n_s=3,02 \cdot 10^{23} \text{ г}^{-1}$				
0,625	31	67	103	34,7	29	63	96	33,0
1,0	37	80	123	43,1	34	75	116	41,1
1,5	42	92	142	49,7	40	87	135	47,3
2,5	51	113	174	61,8	49	107	165	58,8
4,0	60	135	211	76,6	59	127	198	72,2
6,0	68	153	242	89,1	63	143	226	83,7
8,075	72	164	261	97,5	67	153	244	91,3
Железо				Молибден				
$Z=26; n_s=2,80 \cdot 10^{23} \text{ г}^{-1}$				$Z=42; n_s=2,64 \cdot 10^{23} \text{ г}^{-1}$				
0,625	27	63	97	34,9	26	57	90	34,2
1,0	35	78	121	43,9	34	76	120	44,9
1,5	41	91	141	50,5	41	92	143	52,2
2,5	49	102	170	61,3	47	107	169	62,1
4,0	54	122	193	71,1	49	114	182	68,6
6,0	54	126	202	76,6	47	111	180	70,4
8,075	53	125	202	78,5	44	106	172	69,8
Барий				Вольфрам				
$Z=56; n_s=2,46 \cdot 10^{23} \text{ г}^{-1}$				$Z=74; n_s=2,42 \cdot 10^{23} \text{ г}^{-1}$				
0,625	22	50	80	31,6	16	37	59	23,7
1,0	32	72	115	44,5	26	61	97	38,6
1,5	40	91	142	53,0	35	80	127	48,9
2,5	47	108	170	62,8	42	96	153	57,7
4,0	48	111	177	67,4	41	96	155	60,5
6,0	44	104	168	67,5	37	88	144	59,8
8,075	40	95	157	66,1	33	81	134	58,4
Свинец				Уран				
$Z=82; n_s=2,38 \cdot 10^{23} \text{ г}^{-1}$				$Z=92; n_s=2,33 \cdot 10^{23} \text{ г}^{-1}$				
0,625	13	31	50	20,2	11	26	41	17,2

Продолжение табл. 5.48

E_0 , МэВ	$\Delta_{1/10}$	$\Delta_{1/100}$	$\Delta_{1/1000}$	$\Delta_{1/10}^{ac}$	$\Delta_{1/10}$	$\Delta_{1/100}$	$\Delta_{1/1000}$	$\Delta_{1/10}^{ac}$
1,0	24	54	87	35,3	21	48	77	31,6
1,5	33	75	119	46,7	31	70	112	44,8
2,5	38	89	143	55,3	38	86	137	52,7
4,0	38	90	146	57,9	37	86	139	55,0
6,0	34	83	136	57,1	33	79	130	54,2
8,075	32	76	127	55,8	30	73	120	52,9

Таблица 5.49

Значения $\Delta_{1/2}$, $\Delta_{1/10}$, $\Delta_{1/100}$, $\Delta_{1/1000}$, $\Delta_{1/10}^{ac}$, г/см², и поправки на барьерность δ_a для различных материалов для точечного изотропного источника фотонов при измерении дозы в бесконечной среде

E_0 , МэВ	$\Delta_{1/2}$	$\Delta_{1/10}$	$\Delta_{1/100}$	$\Delta_{1/1000}$	$\Delta_{1/10}^{ac}$	δ_a
Вода						
$\bar{Z}=6,6; n_s=3,34 \cdot 10^{23} \text{ г}^{-1}$						
0,03	6	12	20	28	7,5	
0,04	12	21	33	44	10,8	
0,05	18	29	43	56	12,8	
0,06	22	34	50	65	13,8	
0,08	27	41	59	75	15,8	
0,1	29	44	64	81	16,8	
0,145	30	47	69	88	18,5	
0,2	29	49	73	94	20,2	
0,279	29	51	78	102	22,5	
0,3	28	51	78	103	23,0	
0,4	27	53	83	110	25,2	
0,412	27	53	83	110	25,5	
0,5	27	55	87	116	27,5	0,750
0,6	27	57	91	122	29,5	0,759
0,662	27	58	94	126	30,5	0,763
0,7	27	59	96	129	31,5	0,767
0,8	27	60	98	134	32,8	0,777
0,9	28	62	103	140	34,8	0,788
1,0	28	63	105	144	36,5	0,797
1,25	29	68	115	158	40,5	0,839
1,5	29	71	122	168	44,0	0,863
1,75	30	75	129	180	47,5	0,879
2,0	31	78	136	190	50,8	0,892
2,2	32	81	142	198	53,2	0,902
2,75	34	90	158	222	60,8	0,918
3,0	34	91	161	227	62,5	0,924
4,0	37	101	181	258	72,5	0,941
6,0	41	116	213	305	88,8	0,961

Продолжение табл. 5.49

$E_0, \text{МэВ}$	$\Delta_{1/2}$	$\Delta_{1/10}$	$\Delta_{1/100}$	$\Delta_{1/1000}$	$\Delta_{1/10}^{sc}$	δ_λ
8,0	45	128	236	341	100,5	0,970
10,0	47	136	253	367	109,8	0,974

Обычный бетон

$$\bar{Z} = 12,0; n_s = 3,02 \cdot 10^{23} \text{ г}^{-1}$$

0,03	0,9	2,3	4,6	6,9	2,1	
0,04	2,1	5,5	10,1	14,7	4,4	
0,05	3,9	9,7	17,2	24,4	7,1	
0,06	10,4	14,3	24,4	34,0	9,4	
0,08	11,0	22,1	36,3	50,1	13,0	
0,1	14,3	27,8	45,1	61,2	15,4	
0,145	18,4	35,9	57,0	77,0	18,8	
0,2	20,7	41,2	65,8	88,6	21,4	
0,279	22,5	45,8	73,6	99,4	24,2	
0,3	22,8	46,9	75,7	102	24,9	
0,4	23,9	51,1	83,5	113	27,7	
0,412	24,2	51,5	84,4	114	28,1	
0,5	24,8	54,3	89,5	122	30,0	0,799
0,6	25,5	57,0	94,8	130	32,5	0,810
0,662	26,0	58,9	98,2	134	33,6	0,815
0,7	25,8	58,9	98,7	135	34,0	0,819
0,8	26,4	61,9	104	143	36,6	0,829
0,9	26,9	64,2	109	150	38,4	0,839
1,0	27,4	66,5	113	156	40,2	0,845
1,25	28,8	71,8	123	171	44,6	0,867
1,5	29,9	76,4	132	184	48,9	0,882
1,75	31,3	80,7	141	197	52,6	0,895
2,0	32,2	84,4	148	207	56,3	0,905
2,2	33,6	88,8	156	219	59,6	0,912
2,75	35,4	95,0	169	239	65,6	0,925
3,0	36,3	97,5	174	246	68,4	0,930
4,0	38,9	106	193	274	77,6	0,946
6,0	41,9	119	219	315	92,0	0,965
8,0	43,0	125	235	340	100,6	0,976
10,0	45,8	131	246	356	107,0	0,983

Железо

$$z = 26; n_s = 2,80 \cdot 10^{23} \text{ г}^{-1}$$

0,03	0,1	0,3	0,6	0,9	0,3	
0,04	0,2	0,7	1,4	2,0	0,7	
0,05	0,4	1,3	2,7	3,9	1,4	
0,06	0,7	2,3	4,4	6,5	2,1	
0,08	1,7	5,0	9,5	14,2	4,3	
0,1	3,2	8,7	16,6	23,7	7,1	
0,145	6,5	17,4	30,8	44,2	12,6	
0,2	11,0	26,8	47,3	67,1	18,5	

Продолжение табл. 5.49

$E_0, \text{МэВ}$	$\Delta_{1/2}$	$\Delta_{1/10}$	$\Delta_{1/100}$	$\Delta_{1/1000}$	$\Delta_{1/10}^{sc}$	δ_λ
0,279	15,0	35,5	61,5	86,0	23,1	
0,3	15,8	37,9	64,7	89,9	24,1	
0,4	18,9	45,0	77,3	107,3	28,4	
0,412	18,9	45,8	78,9	108,9	28,8	
0,5	20,5	50,5	86,8	119,9	31,6	0,869
0,6	22,1	54,4	93,9	130,2	34,1	0,879
0,662	22,9	56,8	97,8	135,7	35,5	0,883
0,7	22,9	57,6	99,4	138,1	36,1	0,886
0,8	24,4	61,5	105,7	147,5	39,0	0,893
0,9	25,2	64,7	112,0	155,4	41,2	0,899
1,0	26,0	67,1	116,0	162,5	43,2	0,903
1,25	27,6	72,6	127,0	177,5	47,5	0,911
1,5	30,0	78,1	138,1	193,3	52,5	0,919
1,75	30,8	82,0	145,2	204,4	55,6	0,924
2,0	32,3	86,8	154,6	217,8	59,8	0,929
2,2	33,1	89,9	160,2	225,6	62,1	0,932
2,75	35,5	96,2	172,8	244,6	68,2	0,940
3,0	35,5	97,0	175,2	249,3	69,8	0,943
4,0	36,3	101,8	187,0	266,7	76,3	0,956
6,0	38,7	107,3	197,2	284,0	82,8	0,973
8,0	38,7	106,5	198,0	287,2	85,6	0,983
10,0	37,9	105,7	197,2	285,6	86,0	0,987

Вольфрам

$$Z = 74; n_s = 2,42 \cdot 10^{23} \text{ г}^{-1}$$

0,08	0,4	0,8	1,5	2,3	1,0	
0,1	0,4	0,8	1,5	2,3	1,0	
0,12	0,4	1,2	1,9	2,9	0,9	
0,14	0,6	1,4	2,7	3,9	1,2	
0,145	0,6	1,5	3,1	4,4	1,4	
0,16	0,8	2,1	3,9	5,8	1,8	
0,18	0,8	2,5	5,0	7,5	2,4	
0,2	1,2	3,5	6,6	9,6	3,4	
0,279	2,3	6,9	13,7	19,3	6,8	
0,3	2,7	8,5	16,6	25,1	7,7	
0,4	4,8	15,0	29,0	42,5	13,0	
0,412	5,2	15,8	30,9	44,4	14,0	
0,5	7,1	21,2	40,5	59,8	18,3	
0,6	8,9	27,0	52,1	77,2	23,2	
0,662	11,6	30,9	57,9	84,9	26,0	
0,7	11,6	32,8	61,8	88,8	27,5	
0,8	13,1	38,6	73,3	104,2	31,8	
0,9	14,9	42,5	81,1	115,8	34,7	
1,0	17,0	48,2	90,7	131,2	38,1	
1,25	19,3	56,0	104,2	152,5	44,4	

Продолжение табл. 5.49

E_0 , МэВ	$\Delta_{1/2}$	$\Delta_{1/10}$	$\Delta_{1/100}$	$\Delta_{1/1000}$	$\Delta_{1/10}^{ac}$	δ_d
1,5	21,2	63,7	117,7	169,8	50,2	
1,75	23,2	69,5	127,4	185,3	54,0	
2,0	25,1	73,3	135,1	194,9	57,9	
2,2	25,1	75,3	140,9	204,6	60,3	
2,75	25,1	77,2	144,8	210,4	62,7	
3,0	25,1	77,2	144,8	212,3	63,7	
4,0	25,1	75,3	144,8	212,3	66,1	
6,0	21,2	67,6	135,1	202,6	67,6	
8,0	19,3	61,8	123,5	189,1	65,6	
10,0	17,4	56,0	113,9	173,7	62,7	

Свинец

$$Z=82; n_s=2,38 \cdot 10^{23} \text{ г}^{-1}$$

0,1	0,3	0,9	1,9	3,2	1,2	
0,12	0,3	1,0	1,9	2,9	1,2	
0,14	0,4	1,2	2,3	3,4	1,1	
0,145	0,4	1,4	2,5	3,6	1,2	
0,16	0,5	1,6	2,9	4,4	1,4	
0,18	0,5	1,7	3,2	4,6	1,5	
0,2	0,9	2,7	5,1	7,6	2,4	
0,279	1,9	6,1	11,3	18,1	5,7	
0,3	2,2	6,7	13,6	19,3	6,2	
0,4	3,8	12,5	23,8	34,0	11,0	
0,142	4,1	12,5	24,9	36,3	11,6	
0,5	5,9	18,1	34,0	49,9	15,9	0,983
0,6	7,4	22,7	44,2	64,6	20,4	0,984
0,662	8,5	26,1	49,9	73,7	23,0	0,984
0,7	9,1	28,4	53,3	78,2	24,1	0,984
0,8	11,0	34,0	63,5	93,0	28,6	0,984
0,9	12,5	38,6	72,6	105,5	32,3	0,985
1,0	13,6	43,1	80,5	117,9	35,4	0,986
1,25	17,0	51,0	95,2	139,5	42,0	0,986
1,5	19,3	59,0	110,0	159,9	48,2	0,987
1,75	21,5	63,5	119,1	173,5	51,6	0,988
2,0	22,7	68,0	128,1	186,0	55,0	0,989
2,2	23,8	69,2	130,4	189,4	56,4	0,989
2,75	24,9	72,6	137,2	199,6	59,8	0,990
3,0	24,9	73,7	139,5	203,0	61,2	0,990
4,0	24,9	73,7	139,5	203,0	62,1	0,993
6,0	23,8	70,3	133,8	197,3	61,5	0,994
8,0	23,8	69,2	131,5	193,9	61,2	0,995
10,0	23,8	68,0	131,5	193,9	61,0	0,996

Уран

$$Z=92; n_s=2,33 \cdot 10^{23} \text{ г}^{-1}$$

0,12	0,6	1,5	3,2	5,0	1,8	
------	-----	-----	-----	-----	-----	--

Продолжение табл. 5.49

E_0 , МэВ	$\Delta_{1/2}$	$\Delta_{1/10}$	$\Delta_{1/100}$	$\Delta_{1/1000}$	$\Delta_{1/10}^{ac}$	δ_d
0,14	0,6	1,5	2,8	4,3	1,8	
0,145	0,6	1,5	2,8	4,5	1,8	
0,16	0,7	1,7	3,0	4,5	1,7	
0,18	0,7	1,9	3,4	4,9	1,6	
0,2	0,7	2,2	4,1	6,0	1,9	
0,279	1,5	4,3	8,4	12,5	3,9	
0,3	1,7	5,2	10,1	15,0	4,7	
0,4	3,0	9,4	18,1	26,2	8,9	
0,412	3,2	9,7	18,7	28,0	8,9	
0,5	4,5	14,0	28,0	41,1	12,6	
0,6	5,6	18,7	37,4	54,2	17,3	
0,662	7,5	22,4	41,1	61,7	19,2	
0,7	9,4	24,3	44,9	67,3	20,6	
0,8	12,2	28,0	54,2	80,4	25,2	
0,9	14,0	33,7	65,4	95,4	29,0	
1,0	16,8	37,4	71,1	104,7	31,8	
1,25	22,4	44,9	86,0	125,3	38,3	
1,5	26,2	54,2	102,8	149,6	45,3	
1,75	28,0	58,0	110,3	160,8	48,6	
2,0	29,9	63,6	119,7	173,9	52,4	
2,2	33,7	65,4	123,4	181,4	54,7	
2,75	33,7	67,3	130,9	190,7	58,0	
3,0	33,7	67,3	129,0	188,9	58,0	
4,0	31,8	65,4	129,0	190,7	59,4	
6,0	29,9	59,8	119,7	181,4	60,3	
8,0	28,0	54,2	110,3	168,3	58,4	
10,0	26,2	50,5	102,8	155,2	56,6	

Значения $\Delta_{1/10}$, $\Delta_{1/100}$, $\Delta_{1/1000}$, $\Delta_{1/10}^{ac}$ для различных материалов для проведения расчетов защиты приводятся в табл. 5.48 для плоских моноэнергетических изотропных источников фотонов при измерении дозы в барьерной геометрии (расчеты по программе ANISN) [128] и в табл. 5.49 для точечных моноэнергетических изотропных источников при измерении дозы в бесконечной геометрии (по данным универсальных таблиц, см. § 5.5).

Пример. Решить приведенный на стр. 277 пример с использованием слоев ослабления.

Решение. Для $k=2000=2 \cdot 10^3$ пользуемся формулой (5.80). Определяя из табл. 5.49 значения слоев ослабления, находим $d = \Delta_{1/1000} + \Delta_{1/10}^{ac}(m-3) + \Delta_{1/10}^{ac} \xi = 227 + 62,5 \cdot (3-3) + 62,5 \cdot 0,301 = 244$ см. Значение из универсальных таблиц $d=246$ см.

Для проведения расчетов полезны следующие рекомендации [128].

1. Для слоя из элемента, не включенного в табл. 5.48 и 5.49, значения $\Delta_{1/k}$ и $\Delta_{1/10}^{ac}$ можно рассчитать интерполяцией табличных значений для элементов с ближайшими атомными номерами. Для неизвестного элемента с атомным номером Z и числом электронов в 1 г n_s , величину $\Delta_{1/k}$ рассчитывают по формуле

$$\Delta_{1/k} = \frac{(\Delta_{1/k})_1 n_{z_1} (Z_2 - Z) + (\Delta_{1/k})_2 n_{z_2} (Z - Z_1)}{n_3 (Z_2 - Z_1)}, \quad (5.81)$$

где нижний индекс «1» относится к ближайшему предшествующему имеющемуся в таблице элементу с атомным номером Z_1 ; нижний индекс «2» относится к ближайшему последующему в таблице элементу с атомным номером Z_2 ; n_{z_i} — число электронов в 1 г предшествующего ($i=1$) и последующего ($i=2$) элементов соответственно; $n_{z_i} = \frac{N_A}{A_i} Z_i$, г^{-1} , где N_A — постоянная Авогадро; A_i — атомная масса предшествующего ($i=1$) или последующего ($i=2$) элемента.

Аналогично формуле (5.81) записывается формула для определения $\Delta_{1/10}^{\text{ac}}$.
2. Для определения значений $\Delta_{1/k}$ и $\Delta_{1/10}^{\text{ac}}$ для слоя защиты, состоящей из смеси элементов, можно использовать также равенство (5.81), если определить для такой защиты

$$n_3 = \sum_i n_{z_i} = \sum_i \frac{N_A}{A_i} Z_i f_j, \quad (5.82)$$

где n_{z_j} — число электронов j -х атомов в 1 г вещества; f_j — весовая доля j -го элемента с атомным номером Z_j и атомной массой A_j в смеси, а значение эффективного атомного номера рассчитать по формуле

$$\bar{Z} = \sum_i n_{z_i} Z_i / n_3. \quad (5.83)$$

Пример. Рассчитать значение $\Delta_{1/10}^{\text{ac}}$ для фотонов плоского изотропного источника с энергией $E_0 = 8,075$ МэВ и защиты из воды (весовая доля водорода и кислорода $f_H = 0,1119$ и $f_O = 0,8881$ соответственно).

Решение. По формуле (5.82)

$$n_3 = \frac{N_A f_H Z_H}{A_H} + \frac{N_A f_O Z_O}{A_O} = \frac{6,022 \cdot 10^{23} \cdot 0,1119 \cdot 1}{1,0079} + \frac{6,022 \cdot 10^{23} \cdot 0,8881 \cdot 8}{15,999} = 0,668 \cdot 10^{23} + 2,67 \cdot 10^{23} = 3,34 \cdot 10^{23} \text{ г}^{-1}.$$

По формуле (5.83)

$$\bar{Z} = \frac{n_{z_H} Z_H + n_{z_O} Z_O}{n_3} = \frac{0,668 \cdot 10^{23} \cdot 1 + 2,67 \cdot 10^{23} \cdot 8}{3,34 \cdot 10^{23}} = 6,6.$$

Определив по табл. 5.48 для ближайших элементов углерода ($Z=6$) и натрия ($Z=11$) значения $\Delta_{1/10}^{\text{ac}}$ и взяв приведенные в табл. 5.48 значения n_3 для этих элементов, рассчитываем по формуле (5.81)

$$\Delta_{1/10}^{\text{ac}} = \frac{103,7 \cdot 3,01 \cdot 10^{23} \cdot 4,4 + 97,5 \cdot 2,88 \cdot 10^{23} \cdot 0,6}{3,34 \cdot 10^{23} \cdot 5} = 92,3 \text{ г/см}^2,$$

что соответствует этому же значению, приведенному в табл. 5.48.

§ 5.7. МЕТОД КОНКУРИРУЮЩИХ ЛИНИЙ ДЛЯ РАСЧЕТА ЗАЩИТЫ ОТ НЕМОНОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ИСТОЧНИКОВ

Метод конкурирующих линий [9,124] сводит расчеты защиты для немонотонных источников к расчету защиты от монотонных источников, например по универсальным таблицам или по слоям ослабления.

Рекомендуется следующая последовательность расчетов методом конкурирующих линий для немонотонных источников, испускающих m энергетических групп фотонов с энергией i -й группы E_{0i} и вклада

дом фотонов i -й группы в дозу или керма-эквивалент $p_i \left(\sum_{i=1}^m p_i = 1 \right)$.

1. Определяют необходимую кратность ослабления излучения источника защитой k .

2. Рассчитывают парциальную кратность ослабления фотонов i -й энергетической группы

$$k_i = k p_i. \quad (5.84)$$

3. Для каждой энергии фотонов E_{0i} и k_i по универсальным таблицам или по слоям ослабления определяют требуемую толщину защиты d_i .

Энергию фотонов, требующую наибольшей толщины защиты d_r , называют *главной линией спектра*. Энергию фотонов, которая требует следующую по величине после главной линии толщину защиты d_k , называют *конкурирующей линией*.

4. Окончательную толщину определяют равной:

$$d = d_r + \Delta_{1/2}, \text{ если } (d_r - d_k) = 0; \quad (5.85)$$

$$d = d_k + \Delta_{1/2}, \text{ если } 0 < (d_r - d_k) < \Delta_{1/2}; \quad (5.86)$$

$$d = d_r, \text{ если } (d_r - d_k) > \Delta_{1/2}, \quad (5.87)$$

где $\Delta_{1/2}$ — наибольшее значение из слоев половинного ослабления для главной и конкурирующей линий (определяется, например, по универсальным таблицам для толщины защиты d_r и d_k соответственно).

Особо следует отметить, что в конкретной задаче главные и конкурирующие линии часто меняются в зависимости от толщины защиты, пропорциональной кратности ослабления.

Пример. Рассчитать толщину защиты из бетона ($\rho = 2,3$ г/см³), ослабляющую по поглощенной дозе в воздухе в k раз ($k = 20, 10^3, 10^5$) γ -излучение находящихся в одной точке точечных изотропных радионуклидных источников ^{60}Co ($E_0 = 1,25$ МэВ) и ^{137}Cs ($E_0 = 0,662$ МэВ), если керма-эквивалент ^{137}Cs в 4 раза превышает керма-эквивалент ^{60}Co .

Решение. Для решения задачи следует использовать метод конкурирующих линий. Результаты расчетов сведены в табл. 5.50, где приняты введенные выше обозначения. Значения d_i , $\Delta_{1/2}$ определены по универсальной табл. 5.41, окончательная толщина защиты d выбрана в соответствии с формулами (5.86) и (5.87).

Таблица 5.50

Результаты расчета толщины защиты

E_0 , МэВ	p_i	$k=20$		$k=10^3$		$k=10^5$	
		k_i	d_i , см	k_i	d_i , см	k_i	d_i , см
1,25	0,2	4	21	200	60	$2 \cdot 10^1$	100
0,662	0,8	16	30	800	57	$8 \cdot 10^1$	87
$(d_r - d_k)$, см		9		3		13	
$\Delta_{1/2}$ для $\bar{E}_0=1,25$ МэВ, см		8		6		6	
$\Delta_{1/2}$ для $E_0=0,662$ МэВ, см		5		5		4	
d , см		30		$57 + 6 = 63$		100	

Приведенный пример показывает, что при $k=20$ главной является линия $E_0=0,662$ МэВ, при $k=10^3$ обе линии требовали практически одинаковой толщины защиты, при $k=10^5$ главной стала энергия $\bar{E}_0=1,25$ МэВ.

§ 5.8. ЗАЩИТА ОТ РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Одна из основных характеристик генератора рентгеновского излучения (рентгеновской трубки) — радиационный выход* [129—133]. Радиационный выход \dot{D}_r — мощность поглощенной дозы в воздухе, созда-

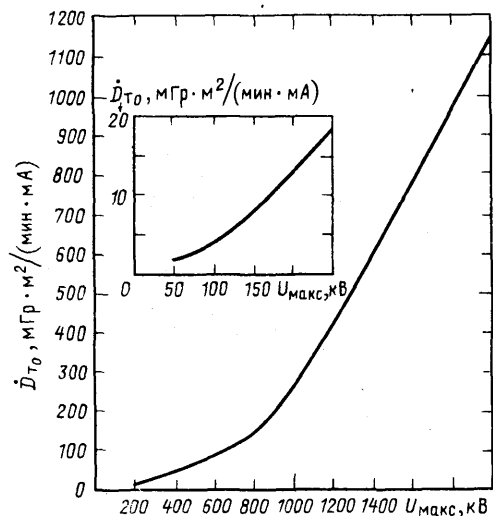


Рис. 5.13. Радиационный выход рентгеновских трубок в зависимости от напряжения на трубке по данным работ [129, 132] (эти данные приняты за стандартную величину при построении номограмм)

* Вместо термина «радиационный выход» используется также термин «лучевая отдача» рентгеновской трубки.

ваемая на расстоянии 1 м от анода рентгеновской трубки при силе тока 1 мА (рис. 5.13). Радиационный выход зависит прежде всего от напряжения, тока трубки, фильтрации пучка. Радиационный выход зависит от конструкции трубки, материала мишени, геометрии облучения. Поэтому, если возможно, радиационный выход лучше определять для каждой конкретной трубки.

Защиту из свинца от широкого пучка рентгеновского излучения можно рассчитать по номограммам рис. 5.14, а, б. Параметром номограмм является коэффициент

$$k_1 = 2,5 \frac{\dot{D}_r}{\dot{D}_{r_0}} m \frac{i}{R^2}, \quad (5.88)$$

где \dot{D}_r — радиационный выход конкретной рентгеновской трубки, для которой определяется в задаче защита; \dot{D}_{r_0} — радиационный выход некоторой стандартной рентгеновской трубки, определяемый из рис. 5.13; заметим, что \dot{D}_r и \dot{D}_{r_0} при подстановке в формулу (5.88) выражаются в одних единицах; m — отношение проектной предельно допустимой мощности эквивалентной дозы для помещений постоянного пребывания персонала категории А при 36-часовой рабочей неделе (см. табл. 3.3) к проектной мощности эквивалентной дозы для данной конкретной задачи при t ч работы в неделю в тех же единицах; i — сила тока в рентгеновской трубке, мА; R — расстояние от анода трубки до рабочего места, м.

Если величина \dot{D}_r для используемой трубки неизвестна, можно попробовать подобрать эту величину из данных рис. 5.15. Если и это не удастся сделать, то с некоторой погрешностью для оценок защиты можно принять $\dot{D}_r = \dot{D}_{r_0}$ (рис. 5.13).

Для 36-часовой рабочей недели при $\dot{D}_r = \dot{D}_{r_0}$ и $m=1$ формула (5.88) приобретает совсем простой вид:

$$k_1 = 2,5i/R^2. \quad (5.89)$$

Заметим, что при использовании данных рис. 5.13 и 5.15 на больших расстояниях, чем приведенные на рисунках, необходимо, строго говоря, учитывать ослабление излучения в воздухе, особенно при низких напряжениях.

Отметим, что защиту следует рассчитывать исходя из номинальных значений тока и напряжения рентгеновской трубки.

Толщину защиты из бетона ($\rho=2,35$ г/см³) можно оценить, исходя из рассчитанной по указанной выше методике толщины защиты из свинца с использованием данных рис. 5.14, в, г.

Если плотность используемого строительного материала (кирпича, бетона) не равна 2,35 г/см³, то найденное значение толщины защитного слоя бетона следует умножить на $2,35/\rho$, где ρ — плотность используемого материала, г/см³.

Пример. Определить толщину защиты из свинца для рентгеновской установки с максимальным напряжением 200 кВ при токе на мишень $i=5$ мА, если расстояние от анода трубки до рабочего места $R=2$ м, время работы персонала 18 ч в неделю, радиационный выход трубки $\dot{D}_r=13,6$ мГр·м²/(мин·мА). По найденной толщине защиты из свинца оценить эквивалентную толщину защиты из бетона.

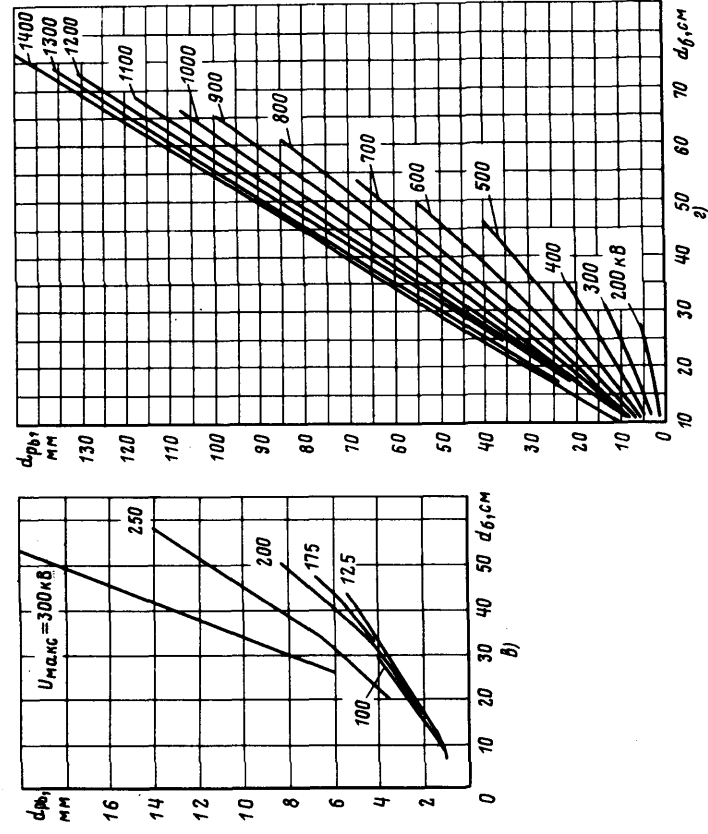
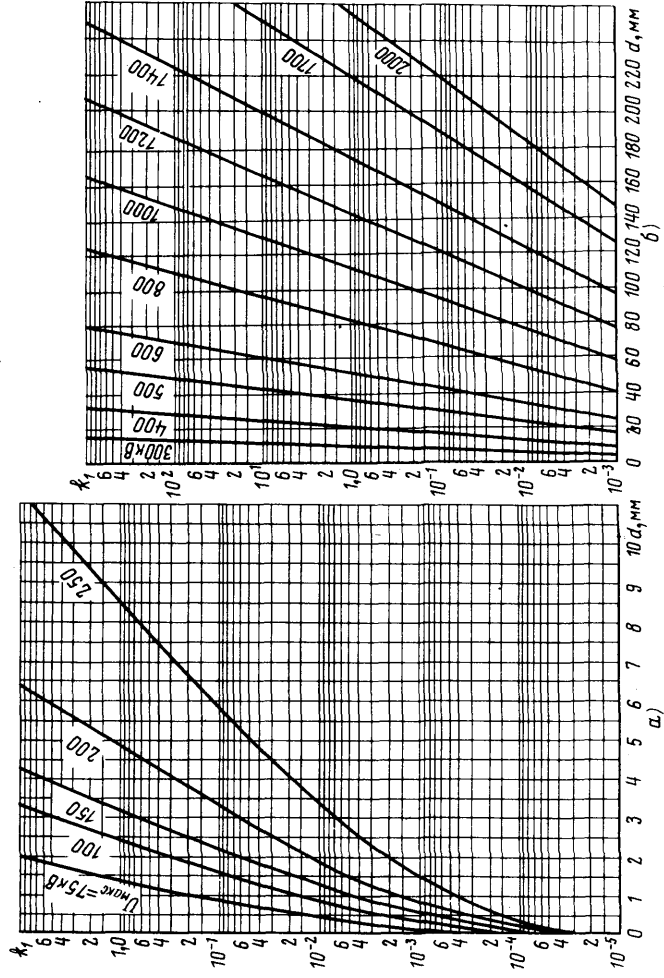


Рис. 5.14. Номограмма для расчета защиты из свинца d от рентгеновского излучения при различных значениях максимального напряжения на рентгеновской трубке U_{\max} (а, б) и отношение между эквивалентной толщиной свинца и бетона ($\rho = 2,35 \text{ г/см}^3$) для рентгеновского излучения различной энергии (в, з) [129]

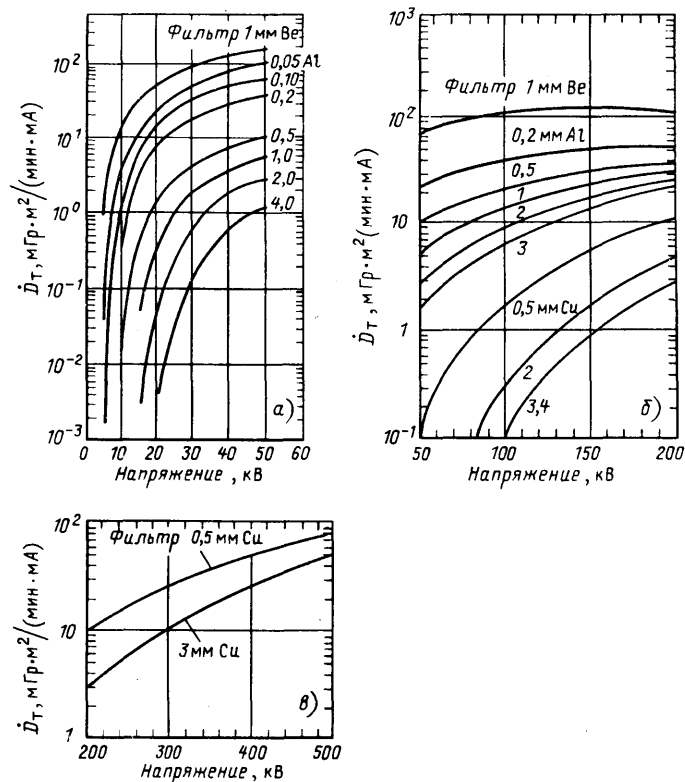


Рис. 5.15. Радиационный выход рентгеновского излучения (данные по воздушной керме) в зависимости от напряжения на трубках с вольфрамовой мишенью с окном трубки из бериллия толщиной 1 мм после различных фильтров (а), с вольфрамовой мишенью с окном трубки из бериллия толщиной 1 мм после различных фильтров (а), с вольфрамовой мишенью после фильтра из меди (в) [133]. На рис. «а» в [133] приведен радиационный выход для расстояния от мишени 10 см. Здесь эти данные пересчитаны по закону «обратных квадратов» к расстоянию 1 м

Решение. По формуле (5.88)

$$k_1 = 2,5 \frac{\dot{D}_T}{\dot{D}_{T_0}} m \frac{i}{R^2} = 2,5 \frac{13,6}{13} \cdot \frac{18}{36} \cdot \frac{5}{4} = 1,63.$$

где $\dot{D}_{T_0} = 13 \text{ мГр}\cdot\text{м}^2/(\text{мин}\cdot\text{мА})$ найдено из рис. 5.13, $m = 18/36$. По номограмме рис. 5.14, а находим, что $k_1 = 1,63$ и $U_{\text{макс}} = 200 \text{ кВ}$ соответствует толщине $d = 5,3 \text{ мм}$ свинца. Из рис. 5.14, в можно оценить, что эквивалентная толщина защиты из бетона ($\rho = 2,35 \text{ г/см}^3$) равна $d = 37 \text{ см}$.

§ 5.9. ГРАФИЧЕСКИЙ МЕТОД РАСЧЕТА ЗАЩИТЫ ОТ γ -ИЗЛУЧЕНИЯ ОБЪЕМНЫХ ИСТОЧНИКОВ

В [134] приведены номограммы, построенные Н. Г. Гусевым для расчетов защиты от γ -излучения объемных моноэнергетических изотропных, равномерных источников для обеспечения предельно допустимой дозы облучения персонала при 36-часовой рабочей неделе за защитой.

Реальный источник характеризовался истинным объемным гамма-эквивалентом в мг-экв. Ра/л. Эти номограммы любезно были предоставлены Н. Г. Гусевым для опубликования впервые в полном объеме в предыдущем издании справочника.

Переход на единицы СИ [5] обуславливает необходимость исключения нестандартизированной величины гамма-эквивалента и ее единицы мг-экв. Ра.

Поэтому в настоящем издании на рис. 5.16—5.22 приводятся указанные выше номограммы Н. Г. Гусева с заменой истинного объемного гамма-эквивалента M_0 в мг-экв. Ра/л на истинный объемный керма-эквивалент k_{e_v} в $\text{нГр}\cdot\text{м}^2/(\text{с}\cdot\text{л})$.

Входной параметр для расчетов защиты по номограммам — фиктивный объемный керма-эквивалент моноэнергетических источников $k_{e_{\phi}}$, $[\text{нГр}\cdot\text{м}^2/(\text{с}\cdot\text{л})]\cdot\text{см}$. Он определяется для цилиндрических источников и источников в виде усеченного конуса

$$k_{e_{\phi}} = k_{e_v} \alpha / \mu_S, \quad (5.90)$$

для линейных источников

$$k_{e_{\phi}} = k_{e_v} R \alpha / \rho = k_{e_v} R^2 \alpha / b. \quad (5.91)$$

Искомая величина — толщина защиты μd . Номограммы рассчитаны без учета рассеянного в защите и источнике излучения. Формула (5.93) позволяет перейти к толщине защиты d_0 с учетом рассеянного в защите излучения.

В формулах (5.90), (5.91) и на номограммах: k_{e_v} — истинный объемный керма-эквивалент источника, $\text{нГр}\cdot\text{м}^2/(\text{с}\cdot\text{л})$; μ_S, μ — линейные коэффициенты ослабления фотонов в материале источника и защиты соответственно, см^{-1} ; d — толщина защитных экранов; R, H — радиус и высота цилиндрических источников; $K = H/R, K = H/(2R)$ — безразмерные параметры; $b, \rho = b/R$ — абсолютное и относительное расстояния от оси цилиндрического источника до точки детектирования по нормали к оси источника соответственно; $a, \rho = a/H$ — абсолютное и относительное расстояния от торца цилиндрического источника по его оси до детектора; α — безразмерный поправочный множитель, характеризующий возможное отклонение в расчетах от принятых при построении номограмм стандартных условий проектирования защиты; геометрические параметры пояснены на рис. 5.16—5.22. Для облегчения пользования графиками на каждой из номограмм приведен пример решения задачи.

Обратим внимание, что истинный объемный керма-эквивалент всегда отнесен к объему 1 л и имеет единицу $\text{нГр}\cdot\text{м}^2/(\text{с}\cdot\text{л})$. Заметим, что, строго говоря, единицы однородных величин следует сокращать. Для этого следовало бы 1 л выразить через 10^{-3} м^3 . И тогда $1 \text{ нГр}\cdot\text{м}^2/(\text{с}\cdot\text{л}) = 10^3 \text{ нГр}/(\text{с}\cdot\text{м})$. Однако для облегчения восприятия объемного керма-эквивалента сохраним за ним единицу $\text{нГр}\cdot\text{м}^2/(\text{с}\cdot\text{л})$.

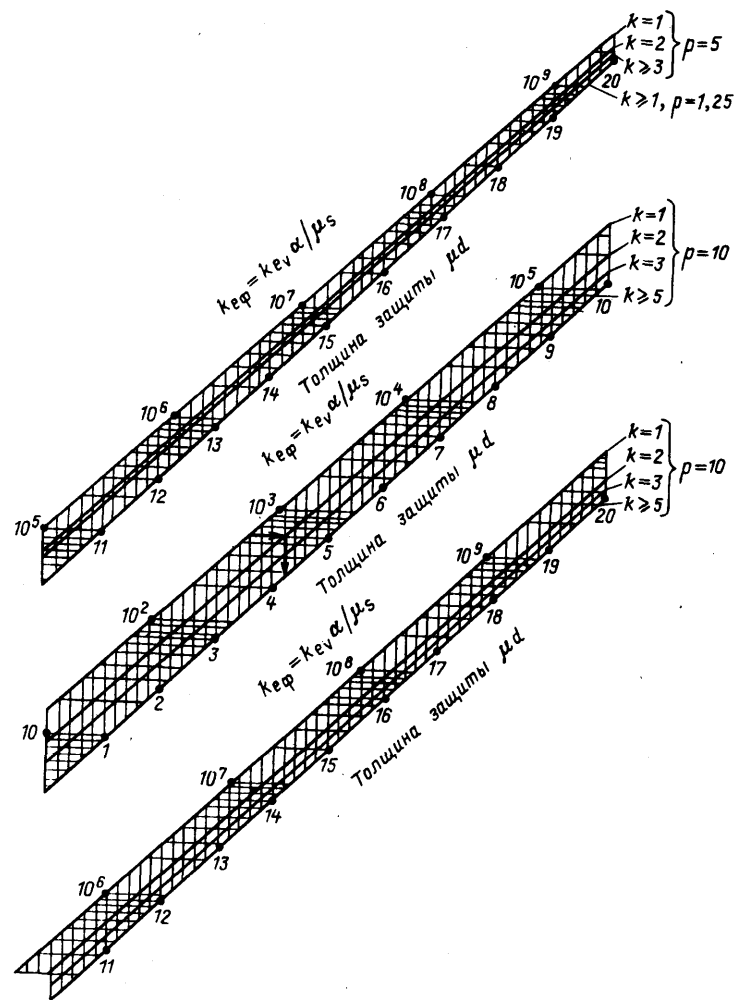
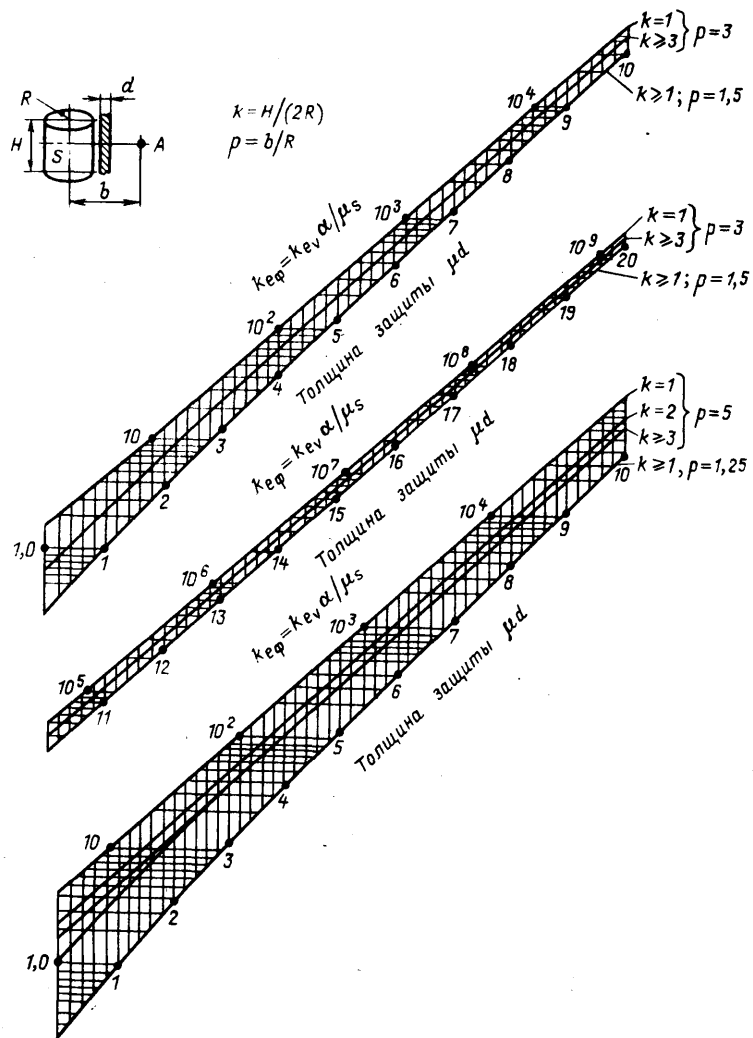


Рис. 5.16. Номограмма для расчета толщины защиты μd от γ -излучения цилиндрического поглощающего источника в радиальном направлении:

$k_{\text{ев}}$ — истинный объемный керма-эквивалент, $\text{нГр} \cdot \text{м}^2 / (\text{с} \cdot \text{л})$; μ_s — коэффициент ослабления в источнике, см^{-1} ; μ — коэффициент ослабления в защите, см^{-1} ; α — поправочный множитель.

Пример. При $k_{\text{ев}} = 6 \cdot 10^2$, $K=2$, $\rho=10$ определяем по номограмме требуемую толщину защиты $\mu d = 4,2$. Толщину защиты с учетом рассеянного излучения определяют далее по формуле (5.93)

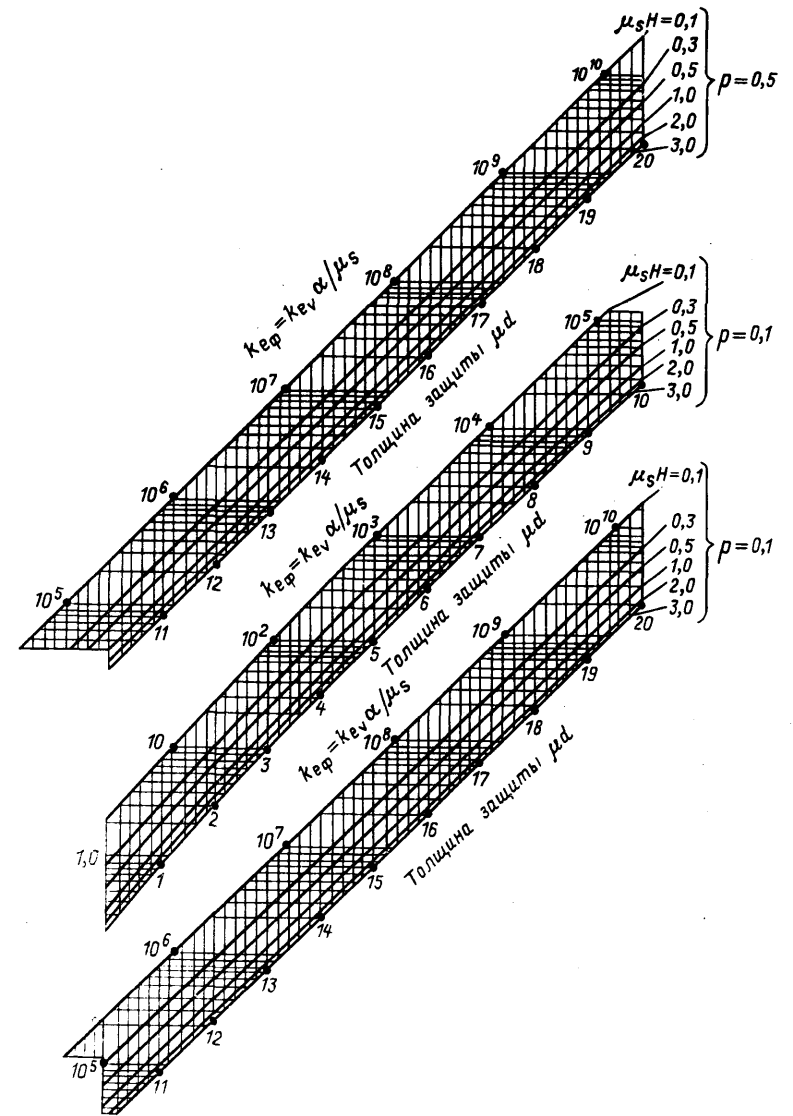
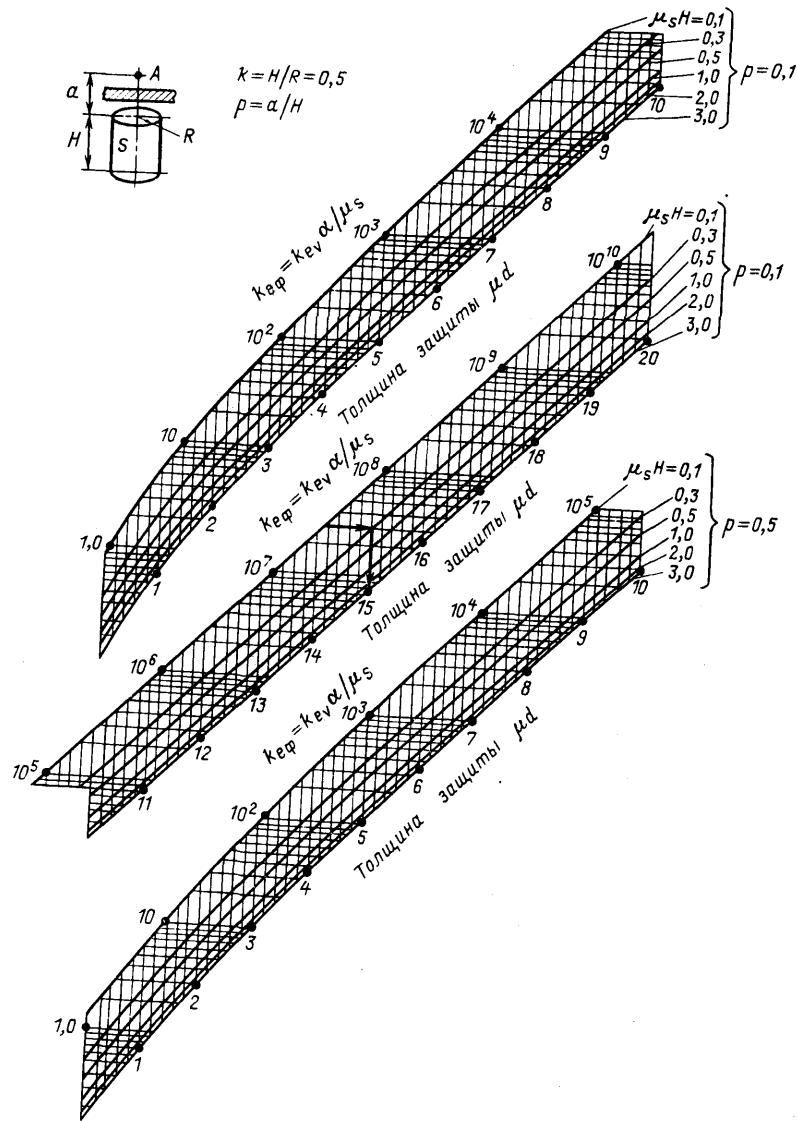


Рис. 5.17. Номограмма для расчета толщины защиты μd от γ -излучения цилиндрического поглощающего источника в осевом направлении при $K = H/R = 0,5$:

$k_{ев}$ — истинный объемный керма-эквивалент, нГр·м²/(с·л); μ_s — коэффициент ослабления в источнике, см⁻¹; μ — коэффициент ослабления в защите, см⁻¹; α — поправочный множитель.

Пример. При $k_{ев} = 3 \cdot 10^7$, $K = 0,5$, $p = 0,1$, $\mu_s H = 0,3$ определяем по номограмме требуемую толщину защиты $\mu d = 15$. Толщину защиты с учетом рассеянного излучения определяют далее по формуле (5.93)

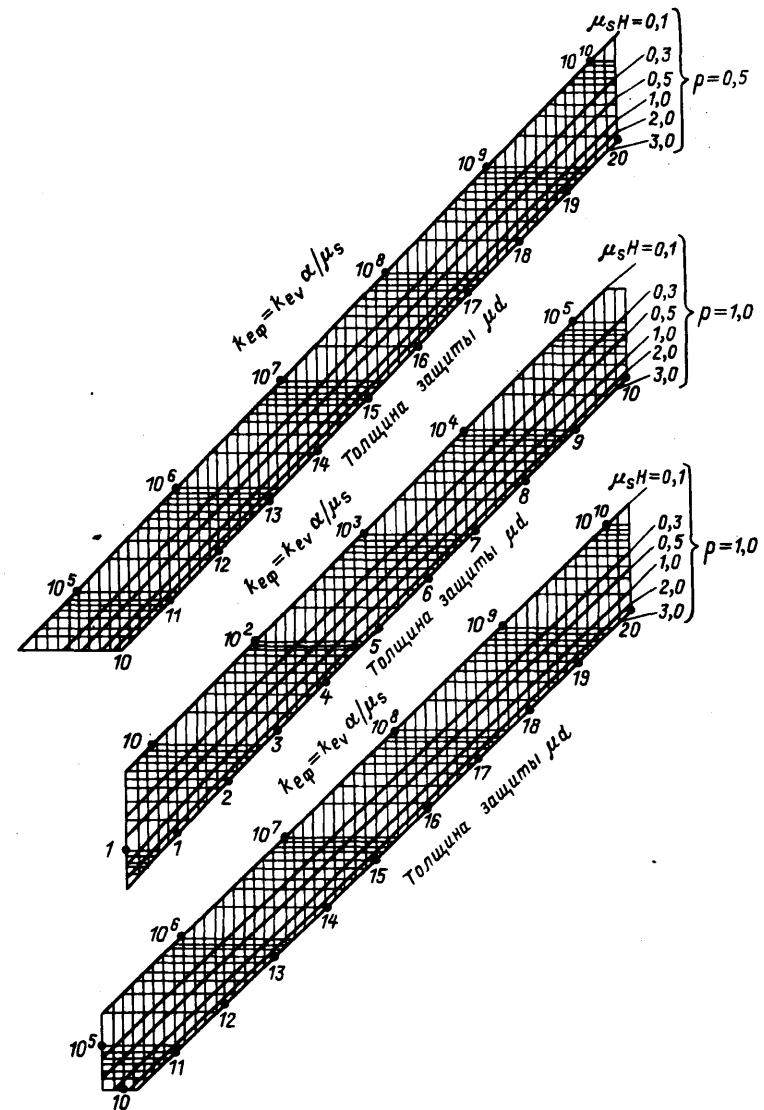
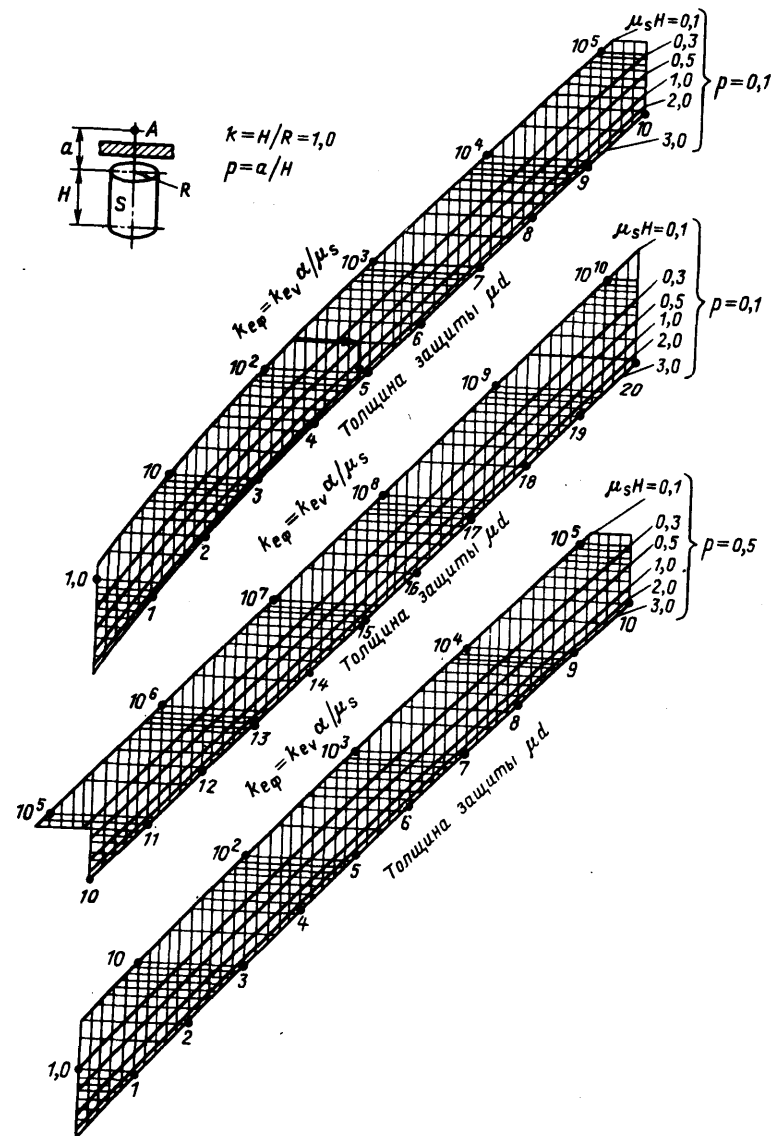


Рис. 5.18. Номограмма для расчета толщины защиты μd от γ -излучения цилиндрического поглощающего источника в осевом направлении при $K = H/R = 1,0$:

$k_{ев}$ — истинный объемный керма-эквивалент, нГр·м²/(с·л); μ_s — коэффициент ослабления в источнике, см⁻¹; μ — коэффициент ослабления в защите, см⁻¹; α — поправочный множитель.

Пример. При $k_{ев} = 2 \cdot 10^2$, $K = 1,0$, $p = 0,1$, $\mu_s H = 0,5$ определяем по номограмме требуемую толщину защиты $\mu d = 4,8$. Толщину защиты с учетом рассеянного излучения определяют далее по формуле (5.93)

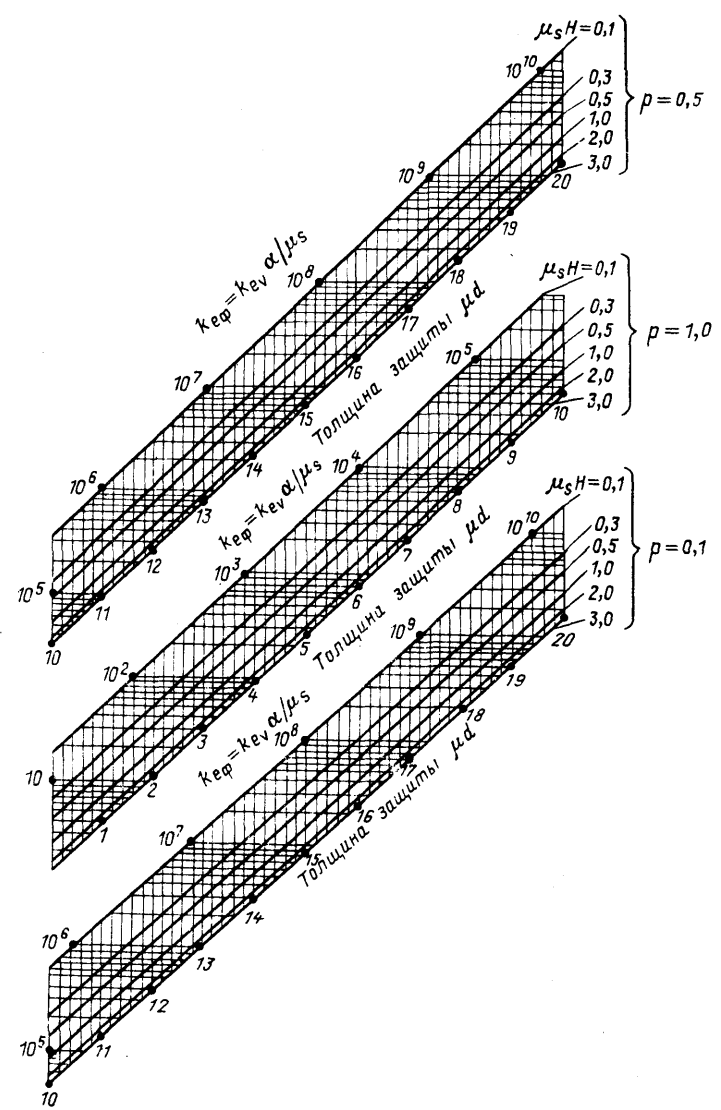
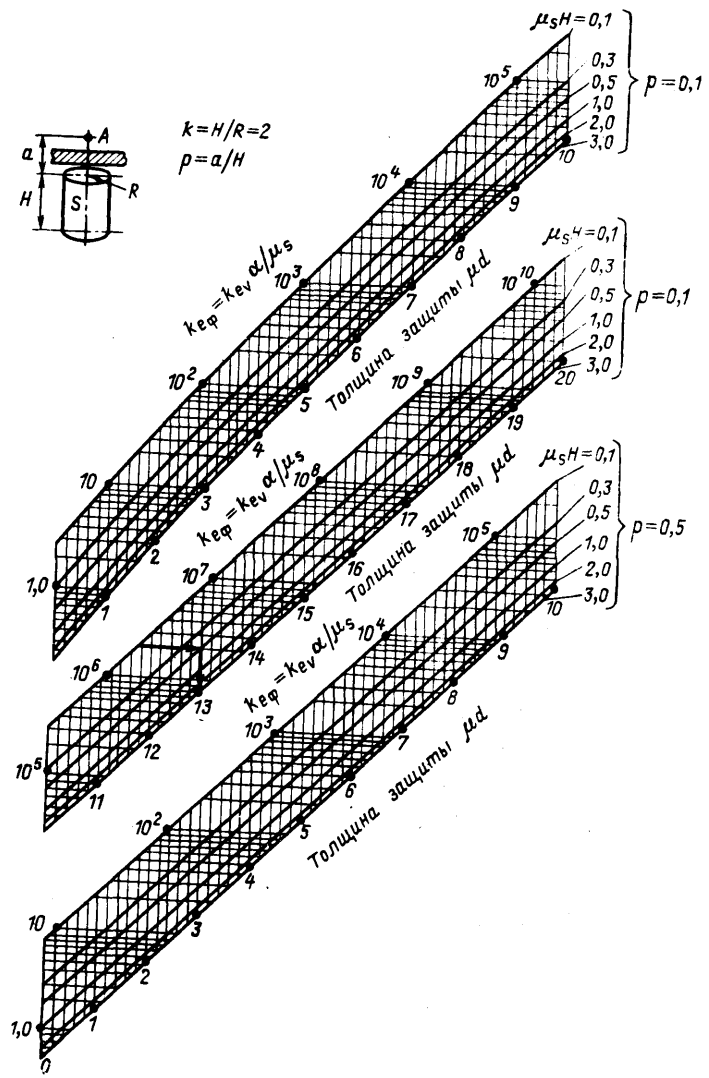


Рис. 5.19. Номограмма для расчета толщины защиты μd от γ -излучения цилиндрического поглощающего источника в осевом направлении при $K=H/R=2$:
 $k_{ев}$ — истинный объемный керма-эквивалент, нГр·м²/(с·л); μ_s — коэффициент ослабления в источнике, см⁻¹; μ — коэффициент ослабления в защите, см⁻¹; α — поправочный множитель.
Пример. При $k_{ев} = 2 \cdot 10^6$, $K = 2,0$, $p = 0,1$, $\mu_s H = 0,5$ определяем по номограмме требуемую толщину защиты $\mu d = 13$. Толщину защиты с учетом рассеянного излучения определяют далее по формуле (5.93)

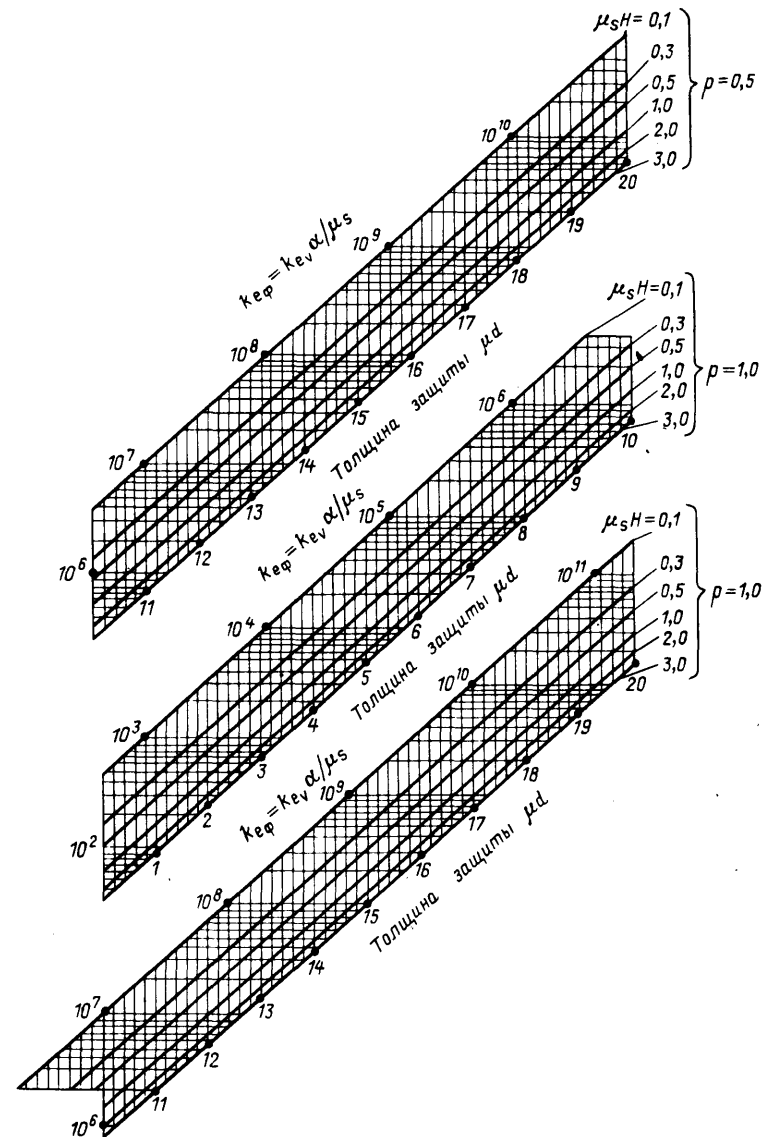
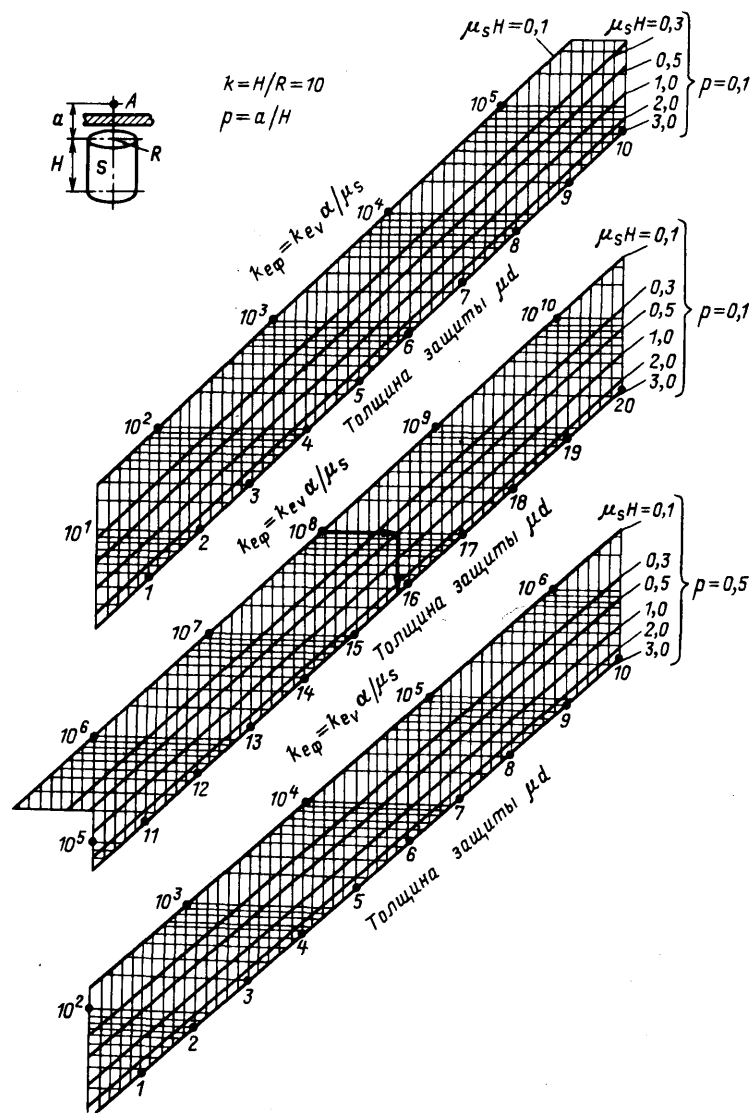


Рис. 5.20. Номограмма для расчета толщины защиты μd от γ -излучения цилиндрического поглощающего источника в осевом направлении при $K = H/R = 10$: $k_{эф}$ — истинный объемный керма-эквивалент, нГр·м²/(с·л); μ_s — коэффициент ослабления в источнике, см⁻¹; μ — коэффициент ослабления в защите, см⁻¹; α — поправочный множитель.

Пример. При $k_{эф} = 10^8$, $K = 10$, $\rho = 0,1$, $\mu_s H = 0,5$ определяем по номограмме требуемую толщину защиты $\mu d = 15,8$. Толщину защиты с учетом рассеянного излучения определяют далее по формуле (5.93)

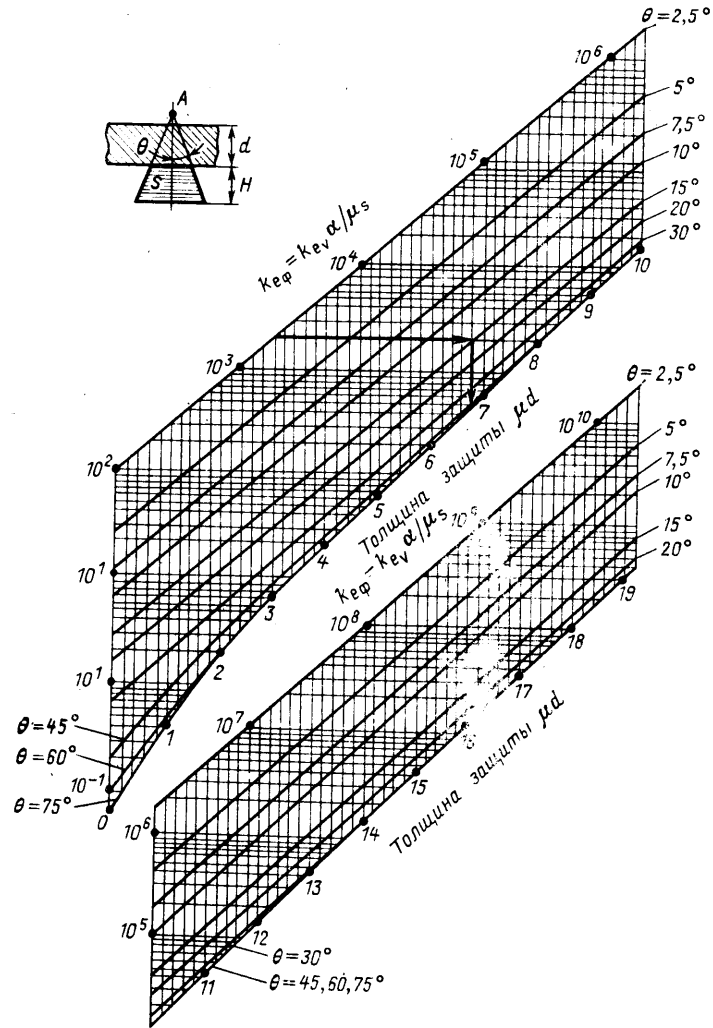


Рис. 5.21. Номограмма для расчета толщины защиты μd от γ -излучения источника в форме усеченного конуса большой высоты при $\mu_s H \geq 3$:

k_{ev} — истинный объемный керма-эквивалент, нГр·м²/(с·л); μ_s — коэффициент ослабления в источнике, см⁻¹; μ — коэффициент ослабления в защите, см⁻¹; α — поправочный множитель.

Пример. При $k_{ev} = 2 \cdot 10^3$, $\theta = 15^\circ$ определяем по номограмме требуемую толщину защиты $\mu d = 6,8$. Толщину защиты с учетом рассеянного излучения определяют далее по формуле (5.93)

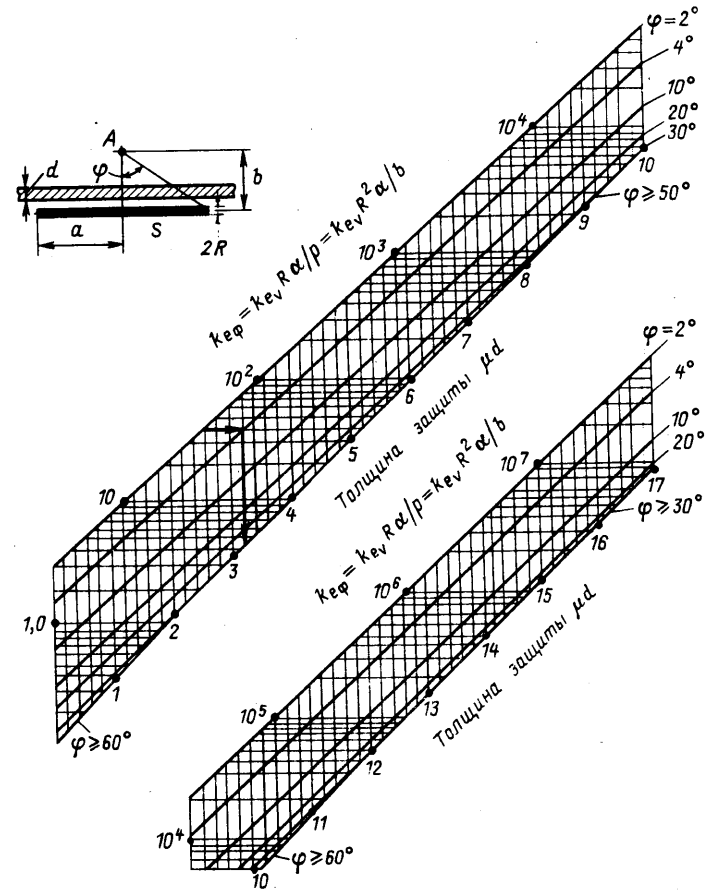


Рис. 5.22. Номограмма для расчета толщины защиты μd от γ -излучения линейного объемного непоглощающего источника:

k_{ev} — истинный объемный керма-эквивалент, нГр·м²/(с·л); R — внутренний радиус источника, см ($\rho = b/R$); φ — угол видимости половины длины источника.

Пример. При $k_{ev} = 40$, $\varphi = 4^\circ$ определяем по номограмме требуемую толщину защиты $\mu d = 3,2$. Толщину защиты с учетом рассеянного излучения определяют далее по формуле (5.93)

Для единицы фиктивного керма-эквивалента $\{[\text{нГр} \cdot \text{м}^2 / (\text{с} \cdot \text{л})] \cdot \text{см}\}$, строго говоря, единицы однородных величин (м^2 , л, см) также следовало бы сократить. Для этого надо было бы л выразить также через 10^{-3} м^3 , 1 см через 10^{-2} м . Тогда $1 [\text{нГр} \cdot \text{м}^2 / (\text{с} \cdot \text{л})] \cdot \text{см} = 10 \text{ нГр/с}$. Однако, так как фиктивная величина $k_{e\phi}$ не имеет глубокого физического смысла, а объем источника обычно выражают в литрах, коэффициент μ_S в см^{-1} , в номограммах для $k_{e\phi}$ сохраним единицу $[\text{нГр} \cdot \text{м}^2 / (\text{с} \cdot \text{л})] \cdot \text{см}$.

При использовании номограммы для нестандартных условий проектирования защиты $\alpha \neq 1$. При этом

$$\alpha = n f g r s u \dots, \quad (5.92)$$

где n — относительный вклад первичных фотонов с энергией E_0 в полный спектр по мощности эквивалентной дозы; $f = \dot{H}_0 / \dot{H}$, где \dot{H}_0 — принятая при построении номограмм мощность эквивалентной дозы, соответствующая облучению персонала при 36-часовой рабочей неделе; \dot{H} — принятая в проекте мощность эквивалентной дозы в тех же единицах; g — геометрический параметр, характеризующий отличие положения точки детектирования от принятого положения при построении номограмм, значение g легко определить из геометрических условий задачи и принципа аддитивности излучения; r — поправка, учитывающая возможное наличие других источников или видов излучения ($r \geq 1$); s — поправка на адсорбцию нуклидов на внутренних стенках аппаратуры, для объемных непоглощающих источников толщиной более 3 д. с. п. $s \approx 1 + (2\mu_S k_{e_s}) / k_{e_v}$ (k_{e_s} — поверхностный керма-эквивалент адсорбированных радионуклидов на внутренних поверхностях аппаратуры); u — коэффициент, характеризующий степень поглощения γ -излучения стенками аппаратуры: $u \approx \exp[-(\mu d - \ln B)]$, где μd — толщина стенок аппаратуры, B — соответствующий фактор накопления.

Для точек детектирования, находящихся в радиальном направлении от цилиндрического источника, при $p = b/R > 10$ и $K = H/2R < 2$ мощность дозы от цилиндрического источника убывает обратно пропорционально квадрату расстояния. Поэтому при $p > 10$, $K < 2$ для радиального направления можно пользоваться номограммами для $p = 10$, принимая при расчетах фиктивный объемный керма-эквивалент равным $k_{e\phi}(p > 10) = k_{e\phi}(p = 10) \cdot (10/p)^2$, где $k_{e\phi}(p = 10) = k_{e\phi} \alpha / \mu_S$ — фиктивный объемный керма-эквивалент в данной задаче.

При $\mu_S H > 3$ для номограмм рис. 5.17—5.20 при расчетах защиты от цилиндрических источников в осевом направлении следует принимать $\mu_S H = 3$.

Номограмму рис. 5.21 с хорошим приближением можно использовать также при расчетах защиты от γ -излучения цилиндрических источников в осевом направлении, если $\mu_S H \geq (3 \div 5)$.

Номограмму для линейного непоглощающего источника (рис. 5.22) можно использовать и для поглощающего источника с введением поправки на самопоглощение.

Расчитанная с использованием описанных выше номограмм толщина защиты d , как отмечалось выше, не учитывает рассеянное в защите излучение. Переход к толщине защиты d_0 с учетом рассеянного излучения осуществляется по формуле

$$d_0 = [(\mu d) + \ln B_d(E_0, \mu d, Z)] / \mu, \quad (5.93)$$

где $B_d(E_0, \mu d, Z)$ — дозовый фактор накопления γ -излучения для точеч-

ного изотропного источника с энергией E_0 в защите толщиной μd , с атомным номером материала Z .

Для немонотонического излучения расчет защиты целесообразно проводить методом конкурирующих линий.

Заметим, что в этом методе не учитывается рассеянное в источнике излучение. Однако для моноэнергетических источников, для которых часто проводится расчет защиты, рассеянным в источнике излучением можно пренебречь с погрешностью 20 %, если толщина защиты из свинца $\mu d_0 \geq 1$, из железа $\mu d_0 \geq 2,5$, из бетона $\mu d_0 \geq 3$ [73].

Глава 6 ЗАЩИТА ОТ НЕЙТРОНОВ

§ 6.1. СЕЧЕНИЯ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ НЕЙТРОНОВ С ВЕЩЕСТВОМ

В табл. 6.1 и 6.2 приводятся сечения взаимодействия тепловых нейтронов [135—141].

Под тепловыми нейтронами понимается нейтронное излучение, находящееся в термодинамическом равновесии с рассеивающими атомами среды.

Сделаем некоторые пояснения к табл. 6.2.

В первых трех столбцах табл. 6.2 приводится информация о ядре-мишени: в первом столбце приведены химический символ элемента, его атомный номер, во втором столбце — атомная масса A , через M обозначено метастабильное состояние, через G — основное состояние, в третьем столбце для стабильного изотопа мишени указано его содержание в естественной смеси p , %, для радиоактивного — указан его период полураспада $T_{1/2}$.

В четвертом столбце приведен период полураспада $T_{1/2}$ атомов с атомной массой $A+1$. Для радиоактивных изотопов в пятом столбце обозначено метастабильное состояние (M) и основное (G), а рядом с вертикальной стрелкой указана в процентах вероятность перехода с верхнего к следующему более низкому состоянию.

В шестом столбце указан тип сечения, для которого в следующих двух колонках приводятся сечения для тепловых нейтронов, факторы Весткотта и резонансные интегралы. Здесь обозначено: «акт» — радиационный захват нейтронов; «погл» — сечение поглощения нейтронов; «дел» — сечение деления; (n, p) , (n, α) — сечения соответствующих реакций.

В седьмом столбце приведены микроскопические сечения σ для тепловых нейтронов со скоростью 2200 м/с, соответствующей энергии 0,0253 эВ, и факторы Весткотта $g(T)$ для $T = 20^\circ \text{C}$. В скобках в этом и восьмом столбцах указана погрешность. Например, 0,0448(30) соответствует $0,0448 \pm 0,0030$, а 18,80(150) соответствует $18,80 \pm 1,50$.

В восьмом столбце помещены резонансные интегралы I от энергии 0,5 эВ.

Сечение радиационного захвата σ_r , 10^{-24} см² [6], Таблица 6.1
и рассеяния σ_s , 10^{-24} см² [6], тепловых нейтронов для защитных
и конструкционных материалов [135—138]

Элемент	Сечение радиационного захвата		Сечение рассеяния	
	σ_r	Зависимость $\sigma_r = \sigma_r(E)$ и возможные энергии пер- вого резонанса E_r	σ_s	Зависимость $\sigma_s = \sigma_s(E)$
¹ H	0,332	1/v	20,44	$\sigma_s = \text{const}$ до 1 кэВ
⁴ Be	0,0092	1/v	6,14	$\sigma_s = \text{const}$ до 100 кэВ
⁵ B*	0,099	1/v	3,6	$\sigma_s = \text{const}$ до 1 кэВ
⁶ C	0,0034	1/v	4,75	$\sigma_s = \text{const}$ до 100 кэВ
⁷ N**	0,0750	1/v	10,6	$\sigma_s = \text{const}$ до 10 эВ
⁸ O	0,000270	В задачах защиты не иг- рает существенной роли	3,76	$\sigma_s = \text{const}$ до 10 кэВ
⁹ F	0,0095	1/v до 20 кэВ, $E_r = 27$ кэВ	4,0	$\sigma_s = \text{const}$ до 20 кэВ
¹¹ Na	0,530	1/v до 200 эВ, $E_r = 2,85$ кэВ	3,2	$\sigma_s = \text{const}$ до 500 эВ
¹² Mg	0,0630	1/v до 1 кэВ, $E_r = 21$ кэВ для ²⁵ Mg	3,416	$\sigma_s = \text{const}$ до 10 кэВ
¹³ Al	0,230	1/v до 100 эВ, $E_r = 5,9$ кэВ	1,49	$\sigma_s = \text{const}$ до 5 кэВ
¹⁴ Si	0,16	1/v до 20 кэВ	2,2	$\sigma_s = \text{const}$ до 5 кэВ
¹⁵ P	0,18	1/v	5,3	$\sigma_s = \text{const}$ до 1 кэВ
¹⁶ S	0,520	$E_r = 30$ кэВ	0,975	$\sigma_s = \text{const}$ до 10 кэВ
¹⁷ Cl*†	33,2	1/v до 200 эВ, $E_r = 400$ эВ	16,0	$\sigma_s = \text{const}$ до 50 эВ
¹⁸ Ar	0,678	1/v; $E_r = 11$ кэВ	0,644	$\sigma_s = \text{const}$ до 10 кэВ
¹⁹ K	2,10	1/v до 1 кэВ	1,5	$\sigma_s \approx \text{const}$ до 1 кэВ
²⁰ Ca	0,43	1/v до 10 кэВ	2,57	$\sigma_s = \text{const}$ до 1,8 кэВ
²² Ti	6,1	1/v до 100 эВ	4,0	Почти постоянно
²³ V	5,04	1/v до 100 эВ	4,93	$\sigma_s = \text{const}$ до 100 эВ
²⁴ Cr	3,1	1/v до 20 эВ	3,8	$\sigma_s = \text{const}$ до 1 кэВ
²⁵ Mn	13,3	1/v до 20 эВ, $E_r = 330$ эВ	2,1	$\sigma_s = \text{const}$ до 10 эВ
²⁶ Fe	2,55	1/v до 20 эВ, $E_r =$ $= 1,167$ кэВ	10,9	$\sigma_s = \text{const}$ до 200 эВ
²⁸ Ni	4,43	1/v до 20 эВ, $E_r = 4,5$ кэВ	17,3	$\sigma_s = \text{const}$ до 300 эВ
²⁹ Cu	3,79	1/v до 100 кэВ	7,9	$\sigma_s = \text{const}$ до 100 эВ
³⁰ Zn	1,10	$E_r = 230$ эВ	4,2	$\sigma_s \approx \text{const}$ до 100 эВ
⁴² Mo	2,65	1/v до 10 эВ, $E_r = 45$ эВ	5,8	$\sigma_s = \text{const}$ до 10 эВ
⁵⁶ Ba	1,2	$E_r = 24$ эВ	8,1	
⁶² Sm	5800	Не 1/v, обусловлена ¹⁴⁹ Sm с содержанием 13,82 % и $\sigma_r = 4,1 \cdot 10^{-20}$ см ² [$4,1 \times$ $\times 10^4$ б]		
⁶⁴ Gd	49 000	Обусловлена в основном ¹⁵⁷ Gd с содержанием 15,68 % и $\sigma_r = 2,54 \times$ $\times 10^{-19}$ см ² [$2,54 \cdot 10^5$ б]		
⁷⁴ W	18,5		5	
⁸² Pb	0,170	1/v, $E_r = 1,33$ кэВ	11,4	$\sigma_s = \text{const}$ до 1 кэВ
⁸³ Bi	0,033	1/v до 500 эВ, $E_r =$ $= 800$ эВ	9	$\sigma_s = \text{const}$ до 300 эВ

*† Для элемента ⁵B $\sigma_{n,\alpha} = 759 \cdot 10^{-24}$ см² [759 б], обусловленное изотопом ¹⁰B с со-
держанием в элементе 19,8 % и сечением $\sigma_{n,\alpha} = 3837 \cdot 10^{-24}$ см² [3837 б].

** Для элемента ⁷N $\sigma_{n,p} = 1,81 \cdot 10^{-24}$ см² [1,81 б].

† Для элемента ¹⁷Cl $\sigma_{n,p} = 0,37 \cdot 10^{-24}$ см² [0,37 б], обусловленное изотопом ³⁵Cl с со-
держанием в элементе 75,77 % и сечением $\sigma_{n,p} = 0,49 \cdot 10^{-24}$ см² [0,49 б].

Таблица 6.2
Сечения взаимодействия σ для нейтронов тепловых энергий,
резонансные интегралы I и факторы Весткотта $g(T)$

Химиче- ский символ и атом- ный но- мер Z	Ядро-мишень		Ядра с массой A+1		Тип сече- ния	σ , 10^{-24} см ² [б], $g(T)$	I , 10^{-24} см ² [б]
	A	ρ , %; $T_{1/2}$	$T_{1/2}$	Изо- мер- ный пере- ход			
¹ H	Ест.	—	—	—	акт	0,3326(7)	0,1489
	1	99,985	—	—	акт	0,3326(7)	0,1489
	2 3	0,015	12,33 года	—	акт акт	0,519(7) · 10 ⁻³ < 0,006 · 10 ⁻³	6,298 · 10 ⁻⁴
² He	Ест.	—	—	—	акт	0,040(10) · 10 ⁻⁹	
	3 4	1,3 · 10 ⁻⁴ 99,99987	—	—	погл акт (n, p) акт	0,0069(1) 0,031(9) · 10 ⁻³ 5333(7) 0,0	0,0031(1) 2401(10)
³ Li	Ест.	—	—	—	акт	0,0448(30)	32
	6 7	7,5 92,5	— 842 мс	—	погл акт (n, α) акт	70,5(3) 0,0385(30) 940(4) 0,0454(30)	425,5 0,01756
⁴ Be	7	53,29 сут	—	—	(n, p) (n, α)	4800(9000) < 0,1	21940
	9 10	100 1,6 · 10 ⁶ лет	1,6 · 10 ⁶ лет 13,8 с	—	акт акт	0,0076(8) < 0,001	0,0040(4)
	⁵ B	Ест.	—	—	—	акт	0,10(9)
⁵ B	10	20	—	—	погл акт	767(4) 0,5(2)	344,4(22)
	11	80	0,02 с	—	погл	3837(9) 0,0055(33)	1722(10) 0,0757
⁶ C	Ест.	—	—	—	акт	3,50(7) · 10 ⁻³	1,55(5) · 10 ⁻³
	12 13	98,89 1,11	— 5730 лет	—	акт акт	3,53(7) · 10 ⁻³ 1,37(4) · 10 ⁻³	1,57(5) · 10 ⁻³ 0,0017(2)
	14	5730 лет	2,449 с	—	акт	< 0,001 · 10 ⁻³	
⁷ N	Ест.	—	—	—	акт	0,0747(73)	0,034
	14 15	99,64 0,36	— 7,13 с	—	погл акт (n, p) акт	1,90(3) 0,0750(75) 1,83(3) 0,024(8) · 10 ⁻³	4,8(24) 0,034 0,00011
⁸ O	Ест.	—	—	—	акт	0,19(2) · 10 ⁻³	0,00036
	16 17	99,756 0,039	— —	—	акт акт	0,190(19) · 10 ⁻³ 0,538(65) · 10 ⁻³	0,00036 0,00039
	18	0,205	26,84 с	—	(n, α) акт	0,235(10) 0,16(1) · 10 ⁻³	0,87(4) · 10 ⁻³
⁹ F	19	100	11,0 с	—	акт	0,0096(5)	0,039(3)
¹⁰ Ne	Ест.	—	—	—	акт	0,039(7)	0,0188

Продолжение табл. 6.2

Ядро-мишень			Ядра с массой A+1		Тип сечения	$\sigma, 10^{-24} \text{ см}^2$ [6], g(T)	I, 10^{-24} см^2 [6]
Химический символ и атомный номер Z	A	p, %; T _{1/2}	T _{1/2}	Изотопный переход			
	20	90,5	—	—	акт	0,037(4)	0,0175
	21	0,27	—	—	акт	0,666(110)	0,296
	22	9,23	37,2 с	—	акт	0,0455(60)	0,023
¹¹ Na	22	2,6019 года	—	—	акт	29000(1000)	170(30) · 10 ³
	23	100	0,0202 с	M ↓100%	акт	0,40(3)	
			14,956 ч	G	акт	0,13(3)	
				M+G	акт	0,530(7)	0,320(15)
¹² Mg	Ест.	—	—	—	акт	0,063(5)	0,038(4)
	24	78,99	—	—	акт	0,051(5)	0,032(4)
	25	10,00	—	—	акт	0,190(30)	0,098(15)
	26	11,01	9,46 мин	—	акт	0,035(2)	0,027(2)
	27	9,46 мин	21,1 ч	—	акт	0,07(2)	
¹³ Al	27	100	2,2407 мин	—	акт	0,232(3)	0,175(5)
¹⁴ Si	Ест.	—	—	—	акт	0,171(6)	0,127(18)
	28	92,2	—	—	акт	0,177(5)	0,110(15)
	29	4,7	—	—	акт	0,101(14)	0,077(15)
	30	3,1	2,62 ч	—	акт	0,107(2)	0,660(60)
	31	2,62 ч	179 лет	—	акт	0,18(4)	
¹⁵ P	31	100	14,282 сут	—	акт	0,172(6)	0,085(10)
¹⁶ S	Ест.	—	—	—	акт	0,52(1)	0,10
					погл	0,53(1)	
					(n, α)	0,008(4)	
	32	95,0	—	—	(n, p)	0,015(8) · 10 ⁻³	0,08
					акт	0,53(4)	
	33	0,75	—	—	(n, α)	0,007(4)	0,097
					акт	0,35(4)	
					(n, α)	0,190(80)	
	34	4,2	—	—	(n, p)	0,002(1)	0,534 (23)
	36	0,015	5,06 мин	—	акт	0,240(10)	0,17(4)
					акт	0,15(3)	
¹⁷ Cl	Ест.	—	—	—	акт	33,1(3)	14,0(10)
					погл	33,5(3)	
	35	75,77	3,01 · 10 ⁵ лет	—	(n, p)	0,37(2)	18(2)
					акт	43,6(4)	
					(n, p)	0,489(14)	
	36	3,01 · 10 ⁵ л	—	—	(n, α)	0,08(4) · 10 ⁻³	
					акт	< 10	
	37	24,23	0,715 с	M ↓100%	акт	0,047(10)	
			37,24 мин	G	акт	0,376(11)	
				M+G	акт	0,423(7)	0,30(6)

Продолжение табл. 6.2

Ядро-мишень			Ядра с массой A+1		Тип сечения	$\sigma, 10^{-24} \text{ см}^2$ [6], g(T)	I, 10^{-24} см^2 [6]
Химический символ и атомный номер Z	A	p, %; T _{1/2}	T _{1/2}	Изотопный переход			
¹⁸ Ar	Ест.	—	—	—	акт	0,675(9)	0,43(3)
	36	0,34	35,04 сут	—	акт	5,2(5)	2,5(5)
	37	35,04 сут	—	—	(n, α)	0,0055(5)	
					(n, α)	1970(330)	
	38	0,07	269 лет	—	(n, p)	69(14)	
	39	269 лет	—	—	акт	0,8(2)	0,4(1)
	40	99,59	—	—	акт	600(300)	
	41	1,822 ч	1,822 ч	—	акт	0,660(10)	0,42(3)
			32,9 года	—	акт	0,5(1)	
¹⁹ K	Ест.	—	—	—	акт	2,1(1)	1,1(1)
	39	93,3	1,262 · 10 ⁹ лет	—	акт	2,1(2)	1,1(1)
					(n, α)	0,0043(5)	
	40	0,012	—	—	акт	30(8)	13(4)
		1,262 · 10 ⁹ лет	—	—	(n, p)	4,4(3)	2,0(2)
	41	6,70	12,36 ч	—	(n, α)	0,39(3)	
					акт	1,46(3)	1,40(10)
²⁰ Ca	Ест.	—	—	—	акт	0,43(2)	0,23(2)
	40	96,94	1,03 · 10 ⁵ лет	—	акт	0,41(2)	0,22(2)
					(n, α)	0,0025(11)	
	41	1,03 · 10 ⁵ лет	—	—	акт	4	
	42	0,65	—	—	акт	0,680(70)	0,39(4)
	43	0,14	—	—	акт	6,2(6)	3,93(15)
	44	2,08	163,8 сут	—	акт	0,88(5)	0,56(1)
	45	163,8 сут	—	—	акт	15	
	46	0,003	4,537 сут	—	акт	0,74(7)	0,32(12)
	48	0,19	8,72 мин	—	акт	1,09(14)	0,90(10)
²¹ Sc	45	100	18,7 с	M ↓100%	акт	9,8(11)	5,4(6)
			83,81 сут	G	акт	17,4(11)	6,1(8)
	46	83,81 сут	3,341 сут	M+G	акт	27,2(2)	11,5(5)
					акт	8,0(10)	
²² Ti	Ест.	—	—	—	акт	6,09(13)	3,1(2)
	46	8,0	—	—	акт	0,59(18)	0,30(9)
	47	7,5	—	—	акт	1,7(2)	1,5(2)
	48	73,7	—	—	акт	7,84(25)	3,9(2)
	49	5,54	—	—	акт	2,2(3)	1,2(2)
	50	5,3	5,76 мин	—	акт	0,179(3)	0,120(15)
²³ V	Ест.	—	—	—	акт	5,07(11)	2,7(1)
	50	0,25	—	—	акт	60(40)	43(15)
	51	99,75	3,75 мин	—	акт	4,93(6)	2,6(1)

Продолжение табл. 6.2

Ядро-мишень			Ядра с массой A + 1		Тип сечения	σ, 10 ⁻²⁴ см ²	
Химический символ и атомный номер Z	A	p, %; T _{1/2}	T _{1/2}	Изотопный переход		σ, 10 ⁻²⁴ см ² [6], g(T)	I, 10 ⁻²⁴ см ² [6]
²⁴ Cr	Ест. 50	—	—	—	акт	3,07(8)	1,5(1)
		4,35	27,690 сут		акт	15,9(2)	8,1(5)
	52	83,79	—		акт	0,76(6)	0,33(4)
	53 54	9,50 2,36	— 3,49 мин		акт акт	18,2(15) 0,36(4)	9,5(10) 0,08(3)
²⁵ Mn	53	3,74 · 10 ⁶ лет	312,16 сут		акт	70(10)	30,5(50)
	54	312,16 сут	—		акт	38	17
	55	100	2,579 ч		акт	13,3(2)	13,8(4)
²⁶ Fe	Ест. 54	—	—	—	акт	2,56(3)	1,4(2)
	56	5,8	2,68 года		акт	2,25(18)	1,2(2)
	57	91,7	—		акт	2,59(14)	1,4(2)
	58	2,19	—		акт	2,48(30)	1,6(2)
		0,31	44,496 сут		акт	1,28(5)	1,4(1)
²⁷ Co	58 M	9,11 ч	—		акт	140000(10000)	540000(200000)
	G	70,92 сут	—		акт	1880(120)	6890
	59	100	10,47 мин	M ↓99,75% G M + G	акт	18,80(150)	39,7(43)
			5,2709 г		акт	18,65(170)	31,4(48)
	60 M	10,47 мин	1,65 ч		акт	37,45(45)	71,1(18)
	G	5,2709 г			акт	58(8) 2,0(2)	230(50) 4,1(10)
²⁸ Ni	Ест. 58	—	—	—	акт	4,49(16)	2,8(3)
		67,76	7,5 · 10 ⁴ лет		акт	4,6(3)	2,8(3)
	59	7,5 · 10 ⁴ лет	—		(п, α) акт	< 0,00003 77,7(41)	140(28)
					погл (п, p)	92(4) 2,0(5)	
	60	26,42	—		(п, α) акт	12,3(6) 2,9(2)	2,10(21)
	61	1,16	—		акт	2,5(8)	1,5(4)
	62	3,71	100,1 года		(п, α) акт	< 0,00003 14,5(3)	8,1(4)
	63 64 65	100,1 года 0,95 2,52 ч	— 2,52 ч 54,6 ч		акт акт акт	24,4(30) 1,58(4) 22,4(20)	1,19(6)
²⁹ Cu	Ест. 63	—	—	—	акт	3,78(2)	4,13(8)
		69,1	12,703 ч		акт	4,50(2)	4,94(10)

Продолжение табл. 6.2

Ядро-мишень			Ядра с массой A + 1		Тип сечения	σ, 10 ⁻²⁴ см ²	
Химический символ и атомный номер Z	A	p, %; T _{1/2}	T _{1/2}	Изотопный переход		σ, 10 ⁻²⁴ см ² [6], g(T)	I, 10 ⁻²⁴ см ² [6]
	65	—	—	—	акт	2,17(3)	2,32(8)
	66	30,9	5,10 мин	61,92 ч	акт	135(10)	
³⁰ Zn	Ест. 64	—	—	—	акт	1,11(2)	2,8(2)
	65	48,9	243,9 сут	243,9 сут	акт	0,76(2)	1,40(5)
	66	27,8	—		(п, α) акт	250(150)	
					(п, α) акт	0,85(20)	1,77
	67	4,1	—		акт	< 0,00002	
	68	18,6	13,9 ч		акт	6,8(8)	25,2
			55,6 мин		акт	0,072(4)	0,24(3)
	70	0,62	3,94 ч		M ↓~100% G M + G	1,0(1) 1,072(100)	3,36(30) 3,6(3)
³¹ Ga	72	46,5 ч	23,5 с		M ↓10% G M + G	0,083(5) 0,092(5)	0,86(6)
					акт	0,059	0,07
	Ест. 69	—	—	—	акт	2,9(1)	21,7(15)
	71	60	21,15 мин	39,7 мс	акт	1,68(7)	15,5(15)
³² Ge	72	40	13,94 ч		акт	0,15(5)	
					M ↓100% G M + G	4,56(23) 4,71(23)	31,1(29)
	72	13,94 ч	4,87 ч		акт	4,25	25,7
³² Ge	Ест. 70	—	—	—	акт	2,3(2)	6,0(10)
		20,7	20,3 мс		акт	0,28(7)	
			11,43 сут		M ↓100% G M + G	3,15(16) 3,43(20)	1,50
	72	27,5	0,499 с		M ↓100% G M + G	0,98(9) 15(2)	0,76 63,7
	73	7,7	—		акт	0,17(3)	0,41(7)
	74	36,4	47,7 с		M ↓~100% G M + G	0,34(8) 0,51(8)	0,59(20) 1,0(2)
	76	7,7	82,78 мин		акт	0,10(1)	1,2(2)
			52,9 с		M ↓21% G M + G	0,06(1) 0,16(2)	0,8(2) 2,0(4)
77 M	52,9 с	11,3 ч		акт	1,48	7,01	
G	—	—	—	акт	—	—	
M + G	—	—	—	акт	—	—	

Продолжение табл. 6.2

Ядро-мишень			Ядра с массой A+1		Тип сечения	$\sigma, 10^{-24} \text{ см}^2$ [6], g(T)	I, 10^{-24} см^2 [6]
Химический символ и атомный номер Z	A	$\rho, \%$ $T_{1/2}$	$T_{1/2}$	Изомерный переход			
³³ As	75	100	26,32 ч		акт	4,48(11)	61(4)
	76	26,32 ч	38,83 ч		акт	60,8	216,1
	77	38,83 ч	90,7 мин		акт	12,69	68,25
³⁴ Se	Ест.	—	—	—	акт	11,7(2)	12,6
	74	0,9	119,779 сут		акт	51,8(12)	514(65)
	76	9,0	17,45 с	M ↓100%	акт	22(1)	17(2)
					G	63(7)	23,3
	77	7,5	—	M+G	акт	85(7)	40,3
					акт	42(4)	32(3)
	78	23,5	3,91 мин	M ↓100%	акт	0,38(20)	3,7(6)
					G	0,05(10)	1,06(80)
	79 M	3,91 мин	6,5·10 ⁴ лет	M+G	акт	0,43(20)	4,76(60)
					акт		
80 G	6,5·10 ⁴ лет	—	M+G	акт		16,0	
				акт			
82	50,0	57,3 мин	M ↓100%	акт	3,28	36(26)	
				акт	0,08(1)	0,42(11)	
82	9,1	18,5 мин	M+G	акт	0,53(4)	1,28(32)	
				акт	0,610(45)	1,70(30)	
82	9,1	70 с	M ↓0%	акт	0,039(3)		
				акт	0,0052(4)	0,08(4)	
82	9,1	22,4 мин	M+G	акт	0,044(3)		
				акт			
³⁵ Br	Ест.	—	—	—	акт	6,9(2)	91(6)
	76	16,2 ч	57,036 ч		(n, p) акт	224(42)	
	79	50,69	4,42 ч	M ↓100%	акт	2,4(6)	35,7(40)
					акт		
	81	49,31	17,68 мин	M+G	акт	8,6(4)	95,7(100)
					акт	11,0(7)	131(11)
	81	49,31	6,1 мин	M ↓97,6%	акт	2,43(40)	41,3
акт							
82 M	6,1 мин	35,32 ч	M+G	акт	0,26	8,9	
				акт	2,7(2)	50,2(59)	
82 G	35,32 ч	—	M+G	акт			
				акт	18,09	90,46	
³⁶ Kr	Ест.	—	—	—	акт	24,5(35)	49(4)
	78	0,35	50 с	M ↓100%	акт	0,17(2)	
					акт		
		35,04 ч		акт	6,03(90)		

Продолжение табл. 6.2

Ядро-мишень			Ядра с массой A+1		Тип сечения	$\sigma, 10^{-24} \text{ см}^2$ [6], g(T)	I, 10^{-24} см^2 [6]
Химический символ и атомный номер Z	A	$\rho, \%$ $T_{1/2}$	$T_{1/2}$	Изомерный переход			
	80	2,25	12,81 с	M+G M ↓100%	акт	6,2(9)	20(1)
					акт	4,55(65)	
	82	11,6	1,83 ч	M+G M ↓100%	акт	6,95(82)	
					акт	11,5(5)	56(7)
	83	11,5	—	M+G	акт	14,0(25)	
					акт	16(10)	190(20)
	84	57,0	4,48 ч	M ↓21%	акт	30(10)	210(30)
					акт	180(30)	2,4
	85	10,72 года	—	G M+G	акт	0,090(13)	
					акт	0,042(4)	0,8
86	17,3	76,3 мин	M+G	акт	0,110(15)	3,2(5)	
				акт	1,66(20)	1,8(10)	
87	76,3 мин	2,84 ч	M+G	акт	0,003(2)	0,10(4)	
				акт	<12600	<270	
³⁷ Rb	Ест.	—	—	—	акт	0,35(1)	4,6(4)
	84	32,9 сут	—		(n, p) акт	12(2)	
	85	72,17	1,02 мин	M ↓100%	акт	0,053(5)	1,74(10)
					акт		
	86M	1,02 мин	18,63 сут	M+G	акт	0,427(11)	3,76(50)
					акт	0,48(1)	5,50(50)
	87	27,83	17,8 мин	M G M+G	акт		
акт					4,92	33(10)	
88	17,8 мин	15,4 мин	M+G	акт	0,120(30)	2,2(3)	
				акт	1,0(3)		
³⁸ Sr	Ест.	—	—	—	погл акт	1,28(6)	10,0(26)
	84	0,56	67,66 мин	M ↓87,3%	акт	0,60(6)	4,59(15)
					акт		
	86	9,9	2,82 ч	G+ 0,873M	акт	0,35(7)	6,6(11)
					акт	0,87(7)	10,6(11)
	86	9,9	2,82 ч	M ↓99,7%	акт	0,84(6)	4,79(24)
					акт		
	87	7,0	—	G M+G	акт	0,20(3)	0,38
					акт	1,04(7)	5,17
	88	82,6	50,62 сут	M+G	акт	16(3)	120(15)
акт					0,058(4)	0,06(1)	
89	50,62 сут	29,2 года	M+G	акт	0,42(4)	0,56(22)	
				акт	0,9(5)	0,47(7)	
91	9,63 ч	2,71 ч	M+G	акт	0,148	0,62	
				акт			

Продолжение табл. 6.2

Ядро-мишень			Ядра с массой A+1		Тип сечения	$\sigma, 10^{-24} \text{ см}^2$ [6], g(T)	I, 10^{-24} см^2 [6]
Химический символ и атомный номер Z	A	$p, \%$ $T_{1/2}$	$T_{1/2}$	Изотопный переход			
³⁹ Y	89	100	3,19 ч	M ↓~100%	акт	0,0010(2)	0,85(15) 1,6 1,4 3,0(15) 1,6(5) 0,99
			64,26 ч	G	акт	1,279(20)	
	64,26 ч	M+G	акт	1,28(2)			
90	64,26 ч	49,71 мин	58,51 сут	M ↓100%	акт	<6,5	
			3,54 ч	G	акт	1,4(3)	
			18,7 мин	M+G	акт	0,078	
91 G	58,51 сут	3,54 ч					
93	10,2 ч	18,7 мин					
⁴⁰ Zr	Ест.	—	—	—	акт	0,185(3)	1,18(16)
	90	51,4	—	—	акт	0,011(5)	0,21(9)
	91	11,2	—	—	акт	1,24(25)	6,8(13)
	92	17,1	1,5 · 10 ⁶ лет	—	акт	0,220(60)	0,63(11)
	93	1,5 · 10 ⁶ лет	—	—	акт	2,6(14)	20(10)
	94	17,5	64,02 сут	—	акт	0,0499(24)	0,30(7)
	95	64,02 сут	—	—	акт	0,49	6,5(14)
	96	2,8	16,9 ч	—	акт	0,0229(10)	5,6(9)
97	16,9 ч	30,7 с	—	акт	0,202	1,55	
⁴¹ Nb	93	100	6,26 мин	M ↓99,5%			8,2(15)
			2,03 · 10 ⁴ лет	G	акт	1,15(5)	
	94	2,03 · 10 ⁴ лет	3,61 сут	M+G	акт	0,6(1)	
			34,979 сут	M ↓94,4%	акт	14,9(10)	
95	34,979 сут	23,35 ч	G	акт	20(1)	120(10)	
			M+G	акт	<7	24(2)	
⁴² Mo	Ест.	—	—	—	акт	2,55(5)	25(1)
	92	14,8	6,9 ч	M ↓99,88%			0,81 0,86 108(4)
			3,5 · 10 ³ лет	G	акт	0,019	
	94	9,1	—	—	акт	0,015	0,86
	95	15,9	—	—	акт	14,0(5)	108(4)
	96	16,7	—	—	акт	0,5(2)	24(4)
	97	9,5	—	—	акт	2,1(5)	15(1)
	98	24,4	66,02 ч	—	акт	0,130(6)	7,3(18)
	99	66,02 ч	—	—	акт	1,733	26(2)
	100	9,6	14,6 мин	—	акт	0,199(3)	4,2(5)

Продолжение табл. 6.2

Ядро-мишень			Ядра с массой A+1		Тип сечения	$\sigma, 10^{-24} \text{ см}^2$ [6], g(T)	I, 10^{-24} см^2 [6]
Химический символ и атомный номер Z	A	$p, \%$ $T_{1/2}$	$T_{1/2}$	Изотопный переход			
⁴³ Tc	98	4,2 · 10 ⁶ лет	6,012 ч	M ↓~100%	акт	0,93(20)	26,7 230(50)
			2,13 · 10 ⁵ лет	G	акт	1,67(130)	
	99 M 'G	6,012 ч 2,13 · 10 ⁵ лет	15,8 с	M+G	акт акт акт	2,6(13) 1,62 20(1)	
⁴⁴ Ru	Ест.	—	—	—	акт	2,57(21)	40(4)
	96	5,5	2,89 сут	—	акт	0,29(2)	5,8(12)
	98	1,9	—	—	акт	<8,0	
	99	12,7	—	—	акт	7,1(10)	166(20)
	100	12,6	—	—	акт	5,0(6)	11,01(70)
	101	17,1	—	—	акт	3,4(9)	88(17)
	102	31,6	39,254 сут	—	акт	1,21(7)	4,6(9)
	103	39,254 сут	—	—	акт	7,71	60(20)
	104	18,6	4,44 ч	—	акт	0,32(2)	5,2(5)
	105	4,44 ч	371,6 сут	—	акт	0,39(6)	6,4(14)
	106	371,6 сут	3,75 мин	—	акт	0,146(45)	1,8(4)
⁴⁵ Rh	103	100	4,34 мин	M ↓99,87%	акт	10(1)	83(6)
			42,3 с	G	акт	135(2)	
	104M	4,34 мин	45 с	35,36 ч	M+G	акт	145(2)
				35,36 ч	M ↓100%		
	G	42,3 с	45 с	35,36 ч	G	акт	800(100)
35,36 ч				M+G	акт	39,53	
105G	35,36 ч	130 мин	30 с	M ↓100%	акт	0,47	4,6 364,6
			30 с	G	акт	40(30)	
				M+G	акт	5000(1000)	
				M ↓0%	акт	11000(3000)	
				G	акт	16000(3160)	16500(2500)
⁴⁶ Pd	Ест.	—	—	—	акт	6,9(4)	83(7)
	102	1,0	16,991 сут	—	акт	3,4(3)	10(2)
	104	11	—	—	акт	0,6(3)	16(2)
	105	22,2	—	—	акт	20(3)	83(9)
	106	27,3	21,3 с	—	акт	0,013(2)	
				6,5 · 10 ⁶ лет	M ↓100%	акт	0,292(29)

Продолжение табл. 6.2

Ядро-мишень			Ядра с массой A + 1		Тип сечения	$\sigma, 10^{-24} \text{ см}^2$ [6], g(T)	I, 10^{-24} см^2 [6]
Химический символ и атомный номер Z	A	p, %; T _{1/2}	T _{1/2}	Изомерный переход			
	107M	21,3 с	—	M + G	акт	0,305 (29)	5,90(53)
	G	6,5 · 10 ⁶ лет	—		акт	1,8(2)	77(7)
	108	26,7	4,69 мин	M	акт	0,183 (33)	2,26(4)
			13,427 ч	↓100%	акт	8,3(5)	224,74(2500)
				M + G	акт	8,483(501)	227(25)
	109M	4,69 мин	—		акт	5,24	60,6
G	13,427 ч	—		акт	0,037(6)	0,6(2)	
110	11,8	5,5 ч	M	↓70,8%	акт	0,190(30)	4,50(63)
			G		акт	0,227(31)	5,1(6)
			23,4 мин	M + G	акт	0,29	10(5)
112	21,04 ч	93 с			акт		
⁴⁷ Ag	Ест.	—	—	—	акт	63,3(4)	748(20)
	107	51,83	127 лет	M	акт	g(T)=1,0034	1,26(19)
			2,37 мин	↓8,7%	акт	0,33(8)	
				G	акт	37,27(120)	93,74(600)
				M + G	акт	37,6(12)	95(6)
	109	48,17	249,76 сут	M	акт	4,7(2)	72,8(50)
			↓1,36%	акт	g(T)=1,0048		
			G	акт	86,3(30)	1377,2(550)	
			M + G	акт	91,0(10)	1450(55)	
110	249,76 сут	64,8 с	M	↓99,3%	акт	82(11)	41,3
			G		акт		
			7,45 сут	M + G	акт		
111M	64,8 с	—			акт		
G	7,45 сут	3,14 ч			акт	3(2)	105(20)
⁴⁸ Cd	Ест.	—	—	—	акт	2520(50)	69,6(57)
	106	1,2	6,5 ч		акт	1	4
	108	0,9	462,6 сут		акт	1,1	11
	109	462,6 сут	—		акт	700(100)	
					(n, α)	0,05	
	110	12,4	48,6 мин	M	акт	0,14(5)	2,5(10)
				↓100%			
				G		10,9	
			M + G	акт	11(1)	40,5(75)	
111	12,8	—		акт	24(3)	53(7)	
112	24,0	14,1 года	M				
			↓0,14%				
			G				
		9,3 · 10 ¹⁵ лет					
			M + G	акт	2,2(5)	13,5(19)	

Продолжение табл. 6.2

Ядро-мишень			Ядра с массой A + 1		Тип сечения	$\sigma, 10^{-24} \text{ см}^2$ [6], g(T)	I, 10^{-24} см^2 [6]
Химический символ и атомный номер Z	A	p, %; T _{1/2}	T _{1/2}	Изомерный переход			
	113	12,3	—		акт	20600(400)	388(45)
	114	28,8	44,6 сут	M	акт	g(T)=1,3266	3,1(15)
				↓0%		0,036(7)	
				G	акт	0,30(2)	19,9(25)
				M + G	акт	0,336(21)	23(2)
	115M	44,6 сут	—		акт	31,2	195,9
G	53,46 ч	—		акт	5,43	79,9	
116	7,6	3,36 ч	M	↓0%	акт	0,025(10)	0,422(248)
			G		акт	0,050(80)	0,928(514)
			M + G	акт	0,075(81)	1,35(45)	
⁴⁹ In	Ест.	—	—	—	акт	193,8(15)	3133(75)
	113	4,3	43,1 мс	M2	акт	3,1(7)	
				↓100%			
				M1	акт	5,0(10)	220(15)
				M1 + M2	акт	8,1(8)	
				↓95,5%			
			G	акт	3,9(4)	90(33)	
			G + M1 + M2	акт	12,0(11)	310(30)	
115	95,7	2,18 с	M2	акт	81(8)		
			↓100%				
			M1	акт	81,3(80)	2605(115)	
			M1 + M2	акт	162,3(7)		
			↓0%				
			G	акт	40(2)	655(30)	
			G + M1 + M2	акт	202,3(20)	3260(150)	
						g(T)=1,0175	
⁵⁰ Sn	Ест.	—	—	—	акт	0,626(9)	6,4(5)
	112	1,0	21,4 мин	M	акт	0,30(4)	
				↓91,1%			
				G	акт	0,71(10)	34(4)
				G + M	акт	0,98(10)	
				+0,911M	акт	1,01(11)	35(4)
			G + M	акт	0,115(30)	5,1(15)	
114	0,66	—		акт	30(7)	27(5)	
115	0,35	—		акт	0,006(2)	0,49(10)	
116	14,4	13,61 сут	M	акт			
			↓100%				
			G	акт	0,134(30)	13,21(250)	

Продолжение табл. 6.2

Ядро-мишень			Ядра с массой A+1		Тип сечения	$\sigma, 10^{-24} \text{ см}^2$ [6]. g(T)	I, 10^{-24} см^2 [6]	
Химический символ и атомный номер Z	A	p, %; $T_{1/2}$	$T_{1/2}$	Изотопный переход				
^{121}Sb	117	7,6	—	M+G	акт	0,140 (30)	13,7 (25)	
	118	24,1	293,1 сут	M ↓100% G	акт акт	2,3 (5) 0,010 (6)	15,7 (21) 1,26	
	119 120	8,6 32,8	— 52 года	M ↓77,6% G	M+G	акт акт	0,21 (5) 0,22 (5)	5,04 6,3 (15)
					M ↓77,6% G	акт	2,2 (5) 0,001 (1)	4,2 (9)
	121M G M+ +G	52 года 27,05 ч	— —	M+G	M+G	акт	0,140 (30) 0,141 (30)	1,25 (30)
					M+G	акт	5,77	26,29
	122	4,7	40,08 мин 129,2 сут	M ↓0% G	M+G	акт	0,001 (1)	—
					M+G	акт	0,180 (20) 0,181 (20)	0,84 (10)
	123M G M+ +G	40,08 мин 129,2 сут	— —	M+G	M+G	акт	0,033	2,53
					M+G	акт	0,130 (5)	8,5 (8)
	124	5,8	9,52 мин 9,64 сут	M ↓0% G	M+G	акт	0,004 (2) 0,134 (6)	0,032 8,532 (800)
					M+G	акт	0,55	14,26
	125M G M+ +G	9,52 мин 9,64 сут	— —	M ↓0% G	M+G	акт	0,297	0,195
					M+G	акт	—	—
	126	1·10 ⁵ лет	1·10 ⁵ лет	M ↓0% G	M+G	акт	—	—
M+G					акт	—	—	
^{123}Sb	Ест.	—	—	—	акт	5,1 (1) 0,06 (1)	170 (20) 13 (1)	
	121	57,3	4,21 мин 2,70 сут	M ↓100% G	акт акт	5,84 (20) 5,9 (2)	189 (15) 202 (15)	
	122M G M+ +G	4,21 мин 2,70 сут	— —	M+G	M+G	акт	21,5	159,0
					M+G	акт	0,019 (10)	—
	123	42,7	20,2 мин	M2 ↓100%	акт	—	—	

Продолжение табл. 6.2

Ядро-мишень			Ядра с массой A+1		Тип сечения	$\sigma, 10^{-24} \text{ см}^2$ [6]. g(T)	I, 10^{-24} см^2 [6]		
Химический символ и атомный номер Z	A	p, %; $T_{1/2}$	$T_{1/2}$	Изотопный переход					
^{125}Te	125	—	93 с	M1 ↓75% G	акт	0,037 (10)	—		
			60,2 сут	G+	акт	4,1 (1)	128 (10)		
			—	+0,75M1 +0,75M2	акт	4,145 (101)			
			2,758 лет	—	акт	17,4 (28)	22,83 0,62		
			19,0 мин	M ↓14% G	акт	—			
			12,4 сут	M+G	акт	0,97	19,38 20		
			—	—	акт	—			
			19,0 мин 12,4 сут	—	акт	5,81	64,5		
			3,85 сут	—	акт	—			
			10,4 мин	M ↓3,6% G	акт	0,92	14,7		
			9,01 ч	M+G	акт	—			
			10,4 мин 9,01 ч	—	акт	1,14	15,9		
			4,40 ч	—	акт	—			
			Ест.	—	—	—	акт	4,7 (1)	54 (4)
			120	0,09	154 сут	M ↓88,6% G	акт	0,34 (6)	
122	2,4	119,7 сут	M+G	акт	2,0 (3)	2,34 (31)			
			M ↓100% G	акт	1,1 (5)				
123M G	119,7 сут 0,87 лет	— —	M+G	акт	2,3 (7)	3,4 (5) 42,89			
			M+G	акт	418 (30)				
124	4,6	57,4 сут	M ↓100% G	акт	0,040 (25)	6,76 (131) 6,8 (13)			
			M+G	акт	—				
125M G	57,4 сут 7,0	— —	M+G	акт	11,09	78,85 19 (3)			
			M+G	акт	1,55 (16)				
126	18,7	107 сут	M ↓97,6% G	акт	0,135 (23)	1,04 8,56			
			M+G	акт	0,90 (15)				

Продолжение табл. 6.2

Ядро-мишень			Ядра с массой A + 1		Тип сечения	$\sigma, 10^{-24} \text{ см}^2$ [6], g(T)	$I, 10^{-24} \text{ см}^2$ [6]
Химический символ и атомный номер Z	A	$\rho, \%$ $T_{1/2}$	$T_{1/2}$	Изотопный переход			
	127M G 128	107 сут 9,35 ч 31,8	—	M + G	акт	1,035 (150)	9,6 (16)
			—		акт	3380 (510)	1140 (170)
			33,6 сут	M	акт	2,76	48,2
	129M G 130	33,6 сут 69,6 мин 34,5	69,6 мин	M ↓65%	акт	0,015 (1)	0,0774 (50)
			—	G	акт	0,1997 (80)	1,54 (11)
			30 ч	M + G	акт	0,2147 (81)	1,62 (11)
	131M G 132	30 ч 25,0 мин 78,6 ч	25,0 мин	M ↓23%	акт	1,11	20,51
			78,6 ч	G	акт	0,37	7,41
			55,4 мин	M + G	акт	0,02 (1)	0,0485
	131M G 132	30 ч 25,0 мин 78,6 ч	12,4 мин	M ↓17%	акт	0,27 (6)	0,446
			—	G	акт	0,29 (6)	0,49 (5)
			—	M + G	акт	0,11	0,16
⁵³ I	125 126 127 129	59,16 сут 13,01 сут 100 1,6 · 10 ⁷ лет	13,01 сут		акт	894 (90)	13730 (2000)
			—		акт	5960	40600
			25,0 мин		акт	6,2 (2)	148 (5)
	130 131	12,36 ч 8,0123 сут	9,2 мин	M ↓83%	акт	18 (2)	
			12,36 ч	G	акт	9 (1)	
			8,0123 сут	M + G	акт	27,0 (22)	37,5
	133M G M + G 135	9 с 20,9 ч 6,61 ч	2,3 ч	M ↓83%	акт	18 (3)	178
			83,6 мин	G	акт	0,7	8,5 (12)
			2,3 ч	M + G	акт	0,003	0,005
	133M G M + G 135	9 с 20,9 ч 6,61 ч	3,69 мин	M	акт	0,003	0,005
			52,6 мин	G	акт	0,003	0,005
			45 с	M + G	акт	0,022	0,023
135	6,61 ч	83 с	M	акт	0,022	0,023	
		—	G	акт	0,022	0,023	
		—	M + G	акт	0,022	0,023	
⁵⁴ Xe	Ест. 124	— 0,096	—	—	акт	23,9 (12)	262 (45)
			57 с	M	акт	28 (5)	600 (100)
			16,9 ч	M ↓100%	акт	137 (21)	2545 (650)
	125 126	16,9 ч 0,090	—	G	акт	165 (20)	3145 (645)
			69,2 с	M + G	акт	(n, α) < 0,03	0,45 (13)
			36,4 сут	M ↓100%	акт	3,05 (81)	42 (15)
125 126	16,9 ч 0,090	—	G	акт	3,05 (81)	42 (15)	
		—	M + G	акт	3,5 (8)	50 (15)	
		—	M + G	акт	3,5 (8)	50 (15)	

Продолжение табл. 6.2

Ядро-мишень			Ядра с массой A + 1		Тип сечения	$\sigma, 10^{-24} \text{ см}^2$ [6], g(T)	$I, 10^{-24} \text{ см}^2$ [6]	
Химический символ и атомный номер Z	A	$\rho, \%$ $T_{1/2}$	$T_{1/2}$	Изотопный переход				
	127 128	36,4 сут 1,919	—		(n, α) акт	< 0,01	20 (10)	
			8,89 сут	M	акт	0,48 (10)		
			—	↓100% G	акт	6,02 (150)	85 (22)	
	129 130	26,44 4,08	—		M + G	акт	6,5 (15)	105 (20)
			11,97 сут	M	акт	21 (5)	252 (17)	
			—	↓100% G	акт	0,45 (10)	1,17	
	131 132	21,18 26,89	—		M + G	акт	6 (1)	13,72
			2,188 сут	M	акт	6,45 (100)	14,89	
			—	↓100% G	акт	85 (10)	890 (120)	
	133 134	5,247 сут 10,4	5,247 сут		M	акт	0,050 (10)	0,9 (2)
			—	↓100% G	акт	0,400 (61)	3,7 (6)	
			—	M + G	акт	0,450 (60)	4,6 (6)	
135 136	9,10 ч 8,87	—		M	акт	190 (90)	356,3	
		15,65 мин	↓~100% G	акт	0,003 (1)	0,1		
		9,10 ч	M + G	акт	0,262 (20)	0,29		
⁵⁵ Cs	133	100	—		акт	0,265 (20)	0,30	
			3,82 мин	M	акт	2,65 (11) · 10 ⁶	7475 (275)	
			—	G	акт	0,26 (2)	0,74 (21)	
	134 135 136 137	2,062 года 2,3 · 10 ⁶ лет 13,16 сут 30,0 лет	2,914 ч		M	акт	0,110 (33)	0,43 (15)
			2,062 года	↓100% G	акт	2,5 (2)	30 (6)	
			2,3 · 10 ⁶ лет	M + G	акт	26,5 (15)	407 (24)	
135 136 137	2,3 · 10 ⁶ лет 13,16 сут 30,0 лет	13,16 сут		M	акт	29,0 (15)	422 (23)	
		30,0 лет	G	акт	140 (12)	54,2		
		2,9 мин	M + G	акт	8,7 (5)	66 (8)		
135 136 137	13,16 сут 30,0 лет	30,0 лет		M	акт	1,3	44 (15)	
		2,9 мин	G	акт	0,110 (33)	0,43 (15)		
		32,2 мин	M + G	акт	0,110 (33)	0,43 (15)		
⁵⁶ Ba	Ест. 130	— 0,101	—		акт	1,2 (1)	9 (2)	
			14,6 мин	M	акт	2,5 (3)		
			11,55 сут	↓100% G	акт	8,8 (9)		
	132	0,097	—		M + G	акт	11,3 (10)	235 (25)
			38,9 ч	M	акт	0,5	3,3 (5)	
			10,535 года	↓~100% G	акт	6,5 (8)		
134	2,42	—		M + G	акт	7,0 (8)		
		28,7 ч	M	акт	0,158 (24)	24 (4)		
		—	↓100% G	акт	1,84 (160)	13 (11)		
134	2,42	—		M + G	акт	2,0 (16)	37 (10)	
		—	G	акт	2,0 (16)	37 (10)		
		—	M + G	акт	2,0 (16)	37 (10)		

Продолжение табл. 6.2

Ядро-мишень			Ядра с массой A + 1		Тип сечения	$\sigma, 10^{-24} \text{ см}^2$ [6], g(T)	I, 10^{-24} см^2 [6]
Химический символ и атомный номер Z	A	P, %; T _{1/2}	T _{1/2}	Изотопный переход			
	135	6,59	0,37 с	M ↓100%	акт	0,0139(7)	0,465(70)
	136	7,81	2,552 мин	G	акт	5,78(90)	109,5(170)
				M+G	акт	5,8(9)	110(17)
	137	11,32	—	M	акт	0,010(1)	0,75(4)
				G	акт	0,39(40)	0,85(30)
	138	71,66	83,04 мин	M+G	акт	0,4(4)	1,6(3)
	139	83,04 мин	12,746 сут		акт	5,1(4)	4,8(6)
140	12,746 сут	18,27 мин		акт	0,360(36)	0,32(7)	
⁵⁷ La	Ест.	—	—	—	акт	8,97(5)	12,7(8)
	138	0,089	—	—	акт	57,2(57)	548(96)
	139	99,911	40,28 ч	—	акт	8,93(4)	12,2(8)
	140	40,28 ч	3,92 ч	—	акт	2,7(3)	69(3)
⁵⁸ Ce	Ест.	—	—	—	акт	0,63(4)	0,67(5)
	136	0,193	34,4 ч	M	акт	0,95(25)	58(12)
				G	акт	6,3(15)	
	138	0,25	56,44 с	M+G	акт	7,25(152)	
				M	акт	0,015(5)	
	139	137,66 сут	—	G	акт	1,1(3)	
				M+G	акт	1,115(300)	
	140	88,48	32,5 сут		акт	500	0,48(4)
	141	32,5 сут	—		акт	0,57(4)	23,7(45)
	142	11,07	33 ч		акт	29(3)	1,14(4)
	143	33 ч	285,8 сут		акт	0,95(5)	40
144	285,8 сут	3,01 мин		акт	6,0(7)	2,6(2)	
⁵⁹ Pr	141	100	14,6 мин	M	акт	3,9(3)	17,8(35)
	142	19,2 ч	13,56 сут	G	акт	7,6(3)	
				M+G	акт	11,5(3)	
	143	13,56 сут	17,28 мин		акт	20(3)	
	145	5,98 ч	24,15 мин		акт	90(10)	
⁶⁰ Nd	Ест.	—	—	—	акт	50,5(20)	43,5(55)
	142	27,13	—	—	акт	18,7(7)	8,5(10)
	143	12,20	—	—	акт	325(10)	136(35)
	144	23,87	—	—	акт	3,6(3)	5(1)
	145	8,29	—	—	акт	42(2)	255(40)
	146	17,18	11,05 сут		акт	1,4(1)	2,7(4)
	147	11,05 сут	—		акт	440(150)	540(150)

Продолжение табл. 6.2

Ядро-мишень			Ядра с массой A + 1		Тип сечения	$\sigma, 10^{-24} \text{ см}^2$ [6], g(T)	I, 10^{-24} см^2 [6]	
Химический символ и атомный номер Z	A	P, %; T _{1/2}	T _{1/2}	Изотопный переход				
	148	5,72	1,72 ч		акт	2,5(2)	14,0(15)	
	150	5,60	12,4 мин		акт	1,2(2)	14,5(20)	
⁶¹ Pm	146	5,53 года	2,623 года		акт	8400(1680)	1045(265)	
	147	2,623 года	41,29 сут	M	акт	85(5)		
				G	акт	96(2)		
	148M	41,29 сут	53,08 ч	↓4,6%	акт	181(7)		
				M+G	акт	22000(2500)		
	G	акт	2000(1000)					
	149	53,08 ч	2,68 ч		акт	1400(300)		
	151	28,4 ч	13,8 мин	M2	акт	43500(4500)		
				M1	акт	825(50)		
				G	акт	1400(400)		
⁶² Sm	Ест.	—	—	—	акт	5800(100)	1430(120)	
	144	3,16	340 сут		акт	0,7		
	147	15,07	—		акт	64(5)	650(50)	
	148	11,27	—		акт	2,7(6)	27(14)	
	149	13,82	—		акт	41000(2000)	3700(400)	
	150	7,47	90 лет	—	—	акт	102(5)	280(30)
	152	26,63	46,67 ч		акт	206(6)	2960(150)	
	153	46,67 ч	—		акт	334,5	3700(2000)	
	154	22,53	22,4 мин		акт	5,5(11)	29(7)	
	156	9,4 ч	6,7 мин		акт	17,16	331,9	
	⁶³ Eu	Ест.	—	—	—	акт	4600(100)	4346(170)
		151	47,77	96 мин	M2	акт	g(T)=0,9069	
↓0%					акт	4,2(20)		
152		52,23	8,8 года	M1	акт	3211(82)		
	↓0%			акт	g(T)=0,8936			
153	8,8 года	4,68 года	G	акт	5935(73)			
			G+	акт	g(T)=0,9022			
154	8,8 года	4,68 года	+M1+	акт	9146(109)			
			+M2	акт	g(T)=0,8992			
152	—	—		акт	2313	3414(197)*2		
153	52,23	8,8 года		акт	603(23)*1			
154	8,8 года	4,68 года		акт	g(T)=1,0290*3	1500(450)		

Продолжение табл. 6.2

Ядро-мишень			Ядра с массой A+1		Тип сечения	$\sigma, 10^{-24} \text{ см}^2$ [6], g(T)	I, 10^{-24} см^2 [6]
Химический символ и атомный номер Z	A	$p, \%$ $T_{1/2}$	$T_{1/2}$	Изомерный переход			
	155 156 157	4,68 года 15,19 сут 15,5 ч	15,19 сут 15,5 ч 45,9 мин		акт акт акт	404(125) 480 190	1680(300) 1660(340) 1350(380)
⁶⁴ Gd	Ест. 152 154 155 156 157 158 159 160	— 0,20 2,15 14,7 20,47 15,68 24,9 18,56 ч 21,9	— 241,6 сут — — — — 18,56 ч — 3,66 мин	—	акт акт акт акт акт акт акт акт акт акт	49000(1000) 1100(100) 85(12) 61000(500) g(T)=0,8387 1,5(12) 254000(2000) g(T)=0,8561 2,5(5) 16,3 0,77(2)	420(15) 3000(300) 280(60) 1570(40) 100(20) 850(100) 80(15) 186,7 7(1)
⁶⁵ Tb	159 160 161	100 72,3 сут 6,9 сут	72,3 сут 6,9 сут 7,7 мин		акт акт акт	23,2(5) 525(100) 96,6	400(25) 1135 655,9
⁶⁶ Dy	Ест. 156 158 160 161 162 163 164 165	— 0,0524 0,0902 2,294 18,88 25,53 24,97 28,18 2,33 ч	— 8,1 ч 144,4 сут — — — — 1,26 мин 2,33 ч 81,5 ч	— M ↓97,8% G M+G	акт акт акт акт акт акт акт акт акт акт	1000(40) 33(3) 43(6) 95(10) 510(30) 245(40) 305(25) 1700(250) 1000(150) 2700(75) 3900(300)	1520(80) 960(80) 120(20) 1240(140) 1300(100) 2500(250) 1700(200) 650(100) 22000(3000)
⁶⁷ Ho	165	100	1200 лет 26,8 ч	M ↓0% G M+G	акт акт акт	3,5(5) 61,2(11) 64,7(12)	55(25) 660(35) 715(55)
⁶⁸ Er	Ест. 162 164 166 167 168 170 171	— 0,136 1,56 33,41 22,94 27,07 14,88 7,52 ч	— 75,0 мин 10,4 ч 2,28 с — 9,4 сут 7,52 ч 49,3 ч	— M ↓100% G M+G	акт акт акт акт акт акт акт акт	162(8) 19(2) 13(2) 15(2) 20(2) 35(4) 670(30) 1,95(5) 5,7(2) 280(30)	745(25) 480(30) 120(10) 125(15) 6000(150) 35(5) 24(4)

Продолжение табл. 6.2

Ядро-мишень			Ядра с массой A+1		Тип сечения	$\sigma, 10^{-24} \text{ см}^2$ [6], g(T)	I, 10^{-24} см^2 [6]
Химический символ и атомный номер Z	A	$p, \%$ $T_{1/2}$	$T_{1/2}$	Изомерный переход			
⁶⁹ Tm	169 170 171	100 128,6 сут 1,92 года	0,004 мс 128,6 сут 63,6 ч	M ↓100% G M+G	акт акт акт акт	8(1) 95(2) 103(3) 92(4) 4,5(2)	 1710(70) 460(50) 118(6)
⁷⁰ Yb	Ест. 168 170 171 172 173 174 176	— 0,140 3,03 14,31 21,82 16,13 31,84 12,73	— 46 с — — — — 68,2 мс 4,19 сут 6,41 с 1,9 ч	— M ↓100% G M+G M ↓100% G M+G	акт акт акт акт акт акт акт акт акт	36,6(20) 3470(100) 10(1) 50(4) 1,3(8) 19(2) 46(4) 19(6) 65(5) 2,4(2)	195(15) 30500(2500) 270(60) 380(45) 25,2(16) 450(55) 34,5(45) 8,1(16)
⁷¹ Lu	Ест. 175 176	— 97,40 2,60 3,59 · 10 ¹⁰ лет	— 3,635 ч 0,160 мс 159,5 сут 6,645 сут	— M ↓0% G M+G M1 M2 ↓22,4% G M1+ +M2+ +G	акт акт акт акт акт акт акт акт	77(3) g(T)=1,4968 15,10(124) 7(1) 22,1(16) 315(60) 2,1(7) 1778(75) 2100(50) g(T)=1,6914	732(63) 523(57) 202(30) 725(65) 3,8(10) 1017(45)
⁷² Hf	Ест. 174 176 177	— 0,163 5,21 18,56	— 70 сут — 4,0 с	— M ↓100% G	акт акт акт акт	102(2) 390(55) 38(6) 1,1(1) 363(9)	2020(65) 288(24) 428(55)

Продолжение табл. 6.2

Ядро-мишень			Ядра с массой A + 1		Тип сечения	$\sigma, 10^{-24} \text{ см}^2$ [6], g(T)	I, 10^{-24} см^2 [6]	
Химический символ и атомный номер Z	A	$\rho, \%$ $T_{1/2}$	$T_{1/2}$	Изомерный переход				
	178	27,1	25,1 сут 18,7 с	M + G	акт	365 (20)	7478 (244)	
				$\begin{matrix} M_2 \\ \downarrow \\ M_1 \\ \downarrow \\ G \end{matrix}$	акт	53 (6)		
	179	13,75	5,519 ч	G	акт	33 (8)		1914 (95) 4,75 (16)
				M + G	акт	86 (7)		
				M	акт	0,34 (3)		
180	35,22	42,38 сут	$\downarrow 100\%$	акт	44,66	563 (55) 568 (55)		
			M + G	акт	45 (5)			
181	42,38 сут	61,5 мин $9 \cdot 10^6$ лет	M	акт	12,6 (7)	33,6 (32)		
			G					
			M + G	акт	40 (30)			
⁷³ Ta	Ест. 180 181	— 0,0123 99,9877	— — 15,8 мин	—	акт	21,6 (7)	717 (25) 600 (200) 0,415 (110)	
				$\downarrow 100\%$	акт	700 (200)		
				115 сут	G	акт	0,012 (3)	717 (25)
					M + G	акт	21,5 (6)	
	182	115 сут	5,1 сут	M + G	акт	21,5 (6)	717 (25)	
				акт	8530 (450)	977 (58)		
⁷⁴ W	Ест.	—	—		акт	18,5 (5)	352 (23)	
	180	0,135	121,2 сут		акт	g(T) = 1,6880		
	182	26,4	—		акт	3,5	200	
	183	14,4	—		акт	20,7 (5)	591 (45)	
	184	30,6	1,67 мин		акт	10,2 (3)	367 (38)	
				75,1 сут	M	акт	0,002 (1)	
				$\downarrow 100\%$	акт	1,8 (2)		
			23,9 ч	G	акт	1,8 (2)	13,4 (25)	
			69,4 сут	M + G	акт	37,0 (15)	490 (15)	
					акт	64 (10)	2670 (550)	
⁷⁵ Re	Ест.	—	—		погл	88,7 (38)	828 (36)	
	185	37,07	90,64 ч		акт	112 (3)	1718 (45)	
	187	62,93	18,6 мин		акт	73 (4)	8,8 (8)	
			16,84 ч		G	акт	1,6 (3)	296,2 (100)
				M + G	акт	75 (4)	305 (10)	
⁷⁶ Os	Ест.	—	—		акт	15,3 (7)	172 (35)	
	184	0,018	93,6 сут		акт	3005 (122)	1354 (52)	
	186	1,59			акт	0,001		
	187	1,64			акт	336 (17)	890 (100)	

Продолжение табл. 6.2

Ядро-мишень			Ядра с массой A + 1		Тип сечения	$\sigma, 10^{-24} \text{ см}^2$ [6], g(T)	I, 10^{-24} см^2 [6]	
Химический символ и атомный номер Z	A	$\rho, \%$ $T_{1/2}$	$T_{1/2}$	Изомерный переход				
	188	13,3	5,8 ч	M	акт	4,3 (10)	135 (35) 0,013 (1)	
				$\downarrow 100\%$	акт	0,26 (3)		
	189	16,1	9,9 мин	M + G	акт	22,74 (400)		750 (50) 750 (50)
				M	акт	23 (4)		
	190	26,4	13,1 ч	M + G	акт	13,20 (31)		26,5 (25)
M				акт	3,9 (8)			
192	41,0	15,4 сут	$\downarrow 100\%$	акт	17,1 (9)	31,7 (25) 58,2 (37)		
			G	акт	1,97 (11)			
193	30,5 ч	6,0 лет	M + G	акт	1540	5,4 (13)		
⁷⁷ Ir	Ест.	—	—		акт	426 (4)	2606 (120)	
	191	38,5	241 год 1,45 мин	M ₂	акт	g(T) = 1,0320	1060 (150)	
				$\begin{matrix} M_2 \\ \downarrow \\ M_1 \\ \downarrow \\ G \end{matrix}$	акт	0,32 (17) 300 (30)		
				73,83 сут	G	акт	624 (20)	3535 (250) 4595 (290)
					M + G	акт	924 (53)	
192	73,83 сут	—			акт	g(T) = 1,0326		
193	61,5	171 сут		M	акт	1100 (400)		
			19,15 ч	$\downarrow 0\%$	акт	5,8 (20)		
				G	акт	110 (15)	1362 (33)	
				M + G	акт	112,5 (75)		
					акт	g(T) = 1,0218		
⁷⁸ Pt	Ест.	—	—		акт	10,0 (2)	128 (15)	
	190	0,0127	2,9 сут		акт	150 (150)		
	192	0,78	4,33 сут		M	акт	2,2 (8)	
				$\downarrow 100\%$	акт			
194	32,9	4,02 сут	50 лет	M + G	акт	< 14	83 (10)	
				M	акт	0,090 (13)		
				$\downarrow 100\%$	акт	1,11		
				G	акт	1,2 (9)	4 (2)	
				M + G	акт	27 (2)	355 (50)	
			95,41 мин	M	акт	0,050 (100)		
			18,3 ч	$\downarrow 96,7\%$	акт			
				G	акт	0,74 (8)	8,3 (20)	
				M + G	акт	0,027 (3)		
			13,6 с	M	акт			
				$\downarrow 100\%$	акт			

Продолжение табл. 6.2

Ядро-мишень			Ядра с массой A + 1		Тип сечения	$\sigma, 10^{-24} \text{ см}^2$ [6], g(T)	$I, 10^{-24} \text{ см}^2$ [6]
Химический символ и атомный номер Z	A	$p, \%$ $T_{1/2}$	$T_{1/2}$	Изотопный переход			
	199	30,8 мин	30,8 мин 12,5 ч	G M + G	акт акт акт	3,673 3,7(2) 1,5(10)	55,6(25)
⁷⁹ Au	197	100	2,695 сут		акт	98,8(3)	1551(13)
	198	2,695 сут	3,139 сут		акт	$g(T) = 1,0038$ 26736(850)	
¹⁰ Hg	Ест. 196	— 0,146	— 23,8 ч 64,12 ч	— M ↓93% G	акт акт	375(5) 120(13)	73(10) 58,9(24)
	198	10,02	42,6 мин	M + G M ↓100% G	акт акт акт	3080(200) 3200(200) 0,018(4)	413(15) 471,9(152) 1,8(3)
	199	16,84	—	M + G	акт	1,882(200)	68,2(300)
	200	23,73	—		акт	1,9(2)	70(30)
	201	13,22	—		акт	2000(1000)	153(30)
	202	29,80	—		акт	< 60	
	204	6,85	46,612 сут 5,2 мин		акт акт	< 60 4,9(1) 0,43(10)	4,43(25) 0,80(4)
⁸¹ Tl	Ест. 203	— 29,50	— 3,784 года	—	акт акт	3,4(5) 11,0(5)	12,3(25) 40(2)
	204	3,784 года	—		акт	21,6(20)	86(17)
	205	70,50	4,18 мин		акт	0,10(3)	0,7(2)
⁸² Pb	Ест. 204	— 1,40	— 1,51 · 10 ⁷ лет	—	акт акт	0,170(2) 0,661(70)	0,16(5) 1,7(5)
	206	25,1	—		акт	0,0305(80)	0,2(1)
	207	21,7	—		акт	0,709(10)	0,4(2)
	208	52,3	3,25 ч		акт	0,487(30)	
⁸³ Bi	209	100	3 · 10 ⁶ лет 5,013 сут	M ↓0% G	акт акт	0,019(2) 0,014(3)	
	210	5,013 сут	2,15 мин	M + G	акт акт	0,033(4) 0,054(5)	0,20(6) 0,20(2)
⁸⁴ Po	210	138,376 сут	25,0 с 0,516 с	M ↓0% G	акт акт	< 0,0005 < 0,030	
⁸⁵ At	211	7,214 ч	122 мс				
⁸⁶ Rn	220	55,61 с	25,0 мин		акт	< 0,2	
	222	3,8235 сут	43,0 мин		акт	0,72(7)	

Продолжение табл. 6.2

Ядро-мишень			Ядра с массой A + 1		Тип сечения	$\sigma, 10^{-24} \text{ см}^2$ [6], g(T)	$I, 10^{-24} \text{ см}^2$ [6]
Химический символ и атомный номер Z	A	$p, \%$ $T_{1/2}$	$T_{1/2}$	Изотопный переход			
⁸⁷ Fr	223	21,8 мин	2,67 мин				
⁸⁸ Ra	223	11,435 сут	3,66 сут		акт	130(20)	
	224	3,66 сут	14,8 сут		акт	12,0(5)	
	226	1608 лет	42,2 мин		акт	11,5(15)	222(15)
	228	5,75 года	4,0 мин		акт	$g(T) = 1,0708$ 36(5)	
⁸⁹ Ac	227	21,773 года	6,15 ч		акт	762(29)	1017(103)
⁹⁰ Th	227	18,718 сут	1,9131 года		дел	200(20)	
	228	1,9131 года	7340 лет		дел	< 0,3	
	229	7340 лет	7,52 · 10 ⁴ лет		акт дел	123(15) 30,5(30) $g(T) = 1,0494$	> 1013 350(80)
	230	7,52 · 10 ⁴ лет	25,60 ч		акт погл дел	54(6) 84,5(67) < 0,0012	1000(175) 1350(190)
	231	25,60 ч	—		акт дел акт	23,2(6) 26,68 160,1	990(40) 156,2 837,6
	232	100	22,3 мин		погл дел акт	186,78 39(4) · 10 ⁻⁶ 7,40(8)	993,8 0,0746(16) 82,3(24)
	233	22,3 мин	24,1 сут		погл дел акт	7,40(8) 15(2) 1500(100)	82,4(24) 84 408(75)
	234	24,1 сут	7,3 мин		погл дел акт	1515 < 0,01 1,8(5)	492(75)
⁹¹ Pa	230	17,4 сут	32760 лет		дел	1500(200)	
	231	32760 лет	1,31 сут		дел	0,006(1) $g(T) = 1,0670$	0,049(13)
	232	1,31 сут	27,0 сут		акт	219(6) $g(T) = 1,0378$ 700(100)	1040(40)
	233	27,0 сут	1,17 мин		дел акт погл акт	464(95) 1164(135) 21(3)	289(67) 425(33)
			6,7 ч	M ↓0,13% G M + G	акт дел акт	20(3) < 0,1 41(3)	440(48) 865(35)

Продолжение табл. 6.2

Ядро-мишень			Ядра с массой A+1		Тип сечения	$\sigma, 10^{-24} \text{ см}^2$ [6], g(T)	I, 10^{-24} см^2 [6]
Химический символ и атомный номер Z	A	p, %; T _{1/2}	T _{1/2}	Изотопный переход			
	234M G	1,17 мин 6,7 ч	24,6 мин		дел дел	$g(T)=1,0579$ < 5000 < 500	
⁹² U	Ест.	—	—	—	дел акт погл дел дел дел	4,19(1) 3,35(2) 7,54(2) 25(10) 400(300) 74(3)	348(35)
	230 231 232	20,8 сут 4,2 сут 68,9 года	4,2 сут 68,9 года 159 270 лет		дел дел дел	$g(T)=0,9739$ 73,1(15) $g(T)=0,9932$ 147,1(34) $g(T)=0,9836$ 522,6(28)	280(15) 628(38)
	233	159 270 лет	245 000 лет		дел акт погл дел	$g(T)=0,9963$ 47,7(20) $g(T)=1,0152$ 578,8(20) $g(T)=0,9977$ < 0,65	783,4(78) 138,1(46) 921,5(91) 5,96
	234	0,005 2,45 · 10 ⁵ лет	7,038 · 10 ⁸ лет		акт погл дел	100,2(15) 101(2) $g(T)=1,001$ 582,2(13)	678(38) 684(38) 276,3(28)
	235	0,720 7,038 · 10 ⁸ лет	2,3415 · 10 ⁷ лет		дел акт погл дел	$g(T)=0,9757$ 93,6(15) $g(T)=1,0052$ 680,8(13) $g(T)=0,9801$ 0,0	141,8(42) 418,1(51) 2
	236	2,3415 · 10 ⁷ лет	6,752 сут		акт погл дел	5,2(3) 5,2(3) $g(T)=1,007$ 2,0	358(8) 360(8) 95,60
	237	6,752 сут	4,4683 · 10 ⁹ лет		акт погл дел	411(100) 413(100) < 0,0005 2,70(2)	373,3 468,9 0,0013(2) 276,3(27)
	238	99,275 4,4683 · 10 ⁹ лет	23,5 мин		акт погл дел акт		

Продолжение табл. 6.2

Ядро-мишень			Ядра с массой A+1		Тип сечения	$\sigma, 10^{-24} \text{ см}^2$ [6], g(T)	I, 10^{-24} см^2 [6]
Химический символ и атомный номер Z	A	p, %; T _{1/2}	T _{1/2}	Изотопный переход			
	239	23,5 мин	14,1 ч		погл дел акт погл	$g(T)=1,009$ 2,70(2) 14(3) 22(5) 36(6) 0,0 1,524 1,524	276,3(27) 264,2 156,6 420,8 1,62 176,2 177,82
	240	14,1 ч			дел дел		
⁹³ Np	234 235	4,4 сут 396,2 сут	396,2 сут 22,5 ч		дел акт	900(300) 1600(200)	
	236G	1,15 · 10 ⁵ лет	1,15 · 10 ⁵ лет	M ↓ 0% G	акт	184(4)	
	237	2,14 · 10 ⁶ лет	2,14 · 10 ⁶ лет	M+G	акт дел	1784 2500(150)	6,5(12)
	238	2,117 сут	2,347 сут		дел акт погл	0,019(3) $g(T)=1,0015$ 169(3) $g(T)=1,0072$ 169(3) $g(T)=1,0072$ 2200(200) 43 2243(200) 31(6)	821,5(580) 828(58) 1454(150) 29 1483
	239	2,347 сут	7,22 мин 61,9 мин	M ↓ 0,12% G M+G	дел дел акт дел акт	14(14) < 1 45(15)	
⁹⁴ Pu	236	2,851 года	45,12 сут		дел акт погл дел дел	165(20) 33 195 2400(300) 16,5(5)	960 197 1157
	237 238	45,12 сут 86,96 года	86,96 года 24 113 лет		дел дел дел	2400(300) 16,5(5)	24,2(27)
	239	24 113 лет	6569 лет		акт погл дел	547(20) 564(20) 744,4(17)	154(9) 178,2(94) 312,2(82)
					акт погл	$g(T)=1,0489$ 268,8(30) $g(T)=1,1686$ 1013,2(35)	191(16) 503,2(180)

Продолжение табл. 6.2

Ядро-мишень			Ядра с массой $A+1$		Тип сечения	$\sigma, 10^{-24} \text{ см}^2$ [6], $g(T)$	$I, 10^{-24} \text{ см}^2$ [6]	
Химический символ и атомный номер Z	A	$p, \%$ $T_{1/2}$	$T_{1/2}$	Изотопный переход				
	240	6569 лет	14,38 года		дел	$g(T)=1,0812$ 0,030(45)	5	
	241	14,38 года	$3,763 \cdot 10^5$ лет		акт	289,5(14)	8460(305)	
					погл	289,53(141)	8465(305)	
	242	$3,763 \cdot 10^5$ лет	4,956 ч		дел	1009(8)	558(18)	
					акт	$g(T)=1,0421$ 368(10)	161(13)	
	243	4,956 ч	$8,08 \cdot 10^7$ лет		погл	$g(T)=1,0314$ 1377(10)	719(22)	
					дел	$g(T)=1,0388$ <0,2	5	
244	$8,08 \cdot 10^7$ лет	10,5 ч	акт	18,5(4)	1131(57)			
			погл	18,7(4)	1136(57)			
245	10,5 ч	10,85 сут	дел	180	518			
⁹⁵ Am	241	432,2 года	14 мс 141,2 года 16,02 ч	M2 M1 ↓99,546% G M+G	акт	$10(5) \cdot 10^{-5}$	208(18)	
					акт	83,8(26)		
					дел	748(20)		1330(117)
	242	141,2 года	7348 лет			дел	$g(T)=1,0287$ 3,15(10)	21,5(17)
						акт	832(20)	1538(118)
						погл	$g(T)=1,0020$ 836,15	1559,5(1180)
	243	7348 лет	26 мин 10,1 ч	M ↓0% G M+G		дел	$g(T)=1,0021$ 6600(300)	2260(200)
						акт	1400(860)	1100(500)
						погл	8000(800)	3360(540)
	244	26 мин	2,05 ч			дел	2900(100)	300
						акт	75,2(18)	2089(11)
						погл	79,5(18)	2213(15)
245	10,1 ч				дел	$g(T)=0,9182$ 1600(300)		
					дел	2300(300)		

Продолжение табл. 6.2

Ядро-мишень			Ядра с массой $A+1$		Тип сечения	$\sigma, 10^{-24} \text{ см}^2$ [6], $g(T)$	$I, 10^{-24} \text{ см}^2$ [6]	
Химический символ и атомный номер Z	A	$p, \%$ $T_{1/2}$	$T_{1/2}$	Изотопный переход				
⁹⁶ Cm	242	161,4 сут	28,5 года		дел	5	33	
	243	28,5 года	18,1 года		акт	16(5)	156(35)	
					погл	21(5)	189(35)	
	244	18,1 года	$8,52 \cdot 10^3$ лет		дел	672(60)	1527(142)	
					акт	138(10)	214(17)	
	245	$8,52 \cdot 10^3$ лет	4730 лет		погл	810(61)	1741(143)	
					дел	1,2(1)	13,4(15)	
	246	4730 лет	$1,56 \cdot 10^7$ лет		акт	13,9(10)	632,6(320)	
					погл	15,1	646(32)	
	247	$1,56 \cdot 10^7$ лет	$3,4 \cdot 10^5$ лет		дел	2020(40)	805(80)	
акт				345(20)	101(8)			
248	$3,4 \cdot 10^5$ лет	64,15 мин	погл	2365(45)	906(80)			
			дел	0,17(10)	11,3(12)			
249	64,15 мин	~7400 лет	акт	1,3(3)	121,3(75)			
			погл	1,47(32)	132,6(76)			
⁹⁷ Bk	249	329 сут	3,217 ч		дел	80(7)	754(60)	
					акт	60(15)	650(250)	
	250	3,217 ч	55,6 мин			погл	140(17)	1404(257)
						дел	0,34(7)	13,1(15)
	251	3,217 ч	55,6 мин			акт	4(1)	275(75)
						погл	4,34(100)	288,1(750)
	252	3,217 ч	55,6 мин			акт	1,6(8)	
						дел		
	⁹⁸ Cf	249	350,7 года	13,08 года		дел	3	5
						акт	1300(3)	1170(80)
250		13,08 года	898 лет			погл	1303(300)	1175(80)
						дел	960(150)	
251		898 лет	2,368 года			дел	1676(51)	2157(70)
						акт	492(28)	743(65)
252		2,368 года	17,81 сут			погл	2168(58)	2900(96)
						дел	350	85
253	17,81 сут	60,5 сут			акт	2030(200)	11600(500)	
					погл	2380(200)	11685(500)	
254	60,5 сут				дел	4300(300)	5400(1500)	
					акт	2850(150)	1600(30)	
255	60,5 сут				погл	7150(350)	7000(1500)	
					дел	32(4)	110(30)	
256	60,5 сут				акт	20,4(15)	43,5(30)	
					погл	52,4(43)	153,5(301)	
257	60,5 сут				дел	1300(240)	2117	
					акт	17,6(18)	13	
258	60,5 сут				погл	1317,6(2400)	2130	
					дел	2	28	

Ядро-мишень			Ядра с массой A + 1		Тип сечения	$\sigma, 10^{-24} \text{ см}^2$ [б], g(T)	I, 10^{-24} см^2 [б]
Химический символ и атомный номер Z	A	$\rho, \%$ $T_{1/2}$	$T_{1/2}$	Изотопный переход			
					акт погл	88 (30) 90 (30)	1650 1678
⁹⁹ Es	253	20,47 сут	39,3 ч	M ↓0% G M+G	акт	155 (20)	3009 (168)
			275,7 сут		дел	3	4299 (218)
	254M	39,3 ч	39,8 сут		дел	158 (20)	7308 (275)
	G	275,7 сут			дел	1840 (80)	1000
					акт погл	1,3 1841,3	
					дел	2830 (130)	2200 (90)
					акт погл	40 2870 (130)	
	255	39,8 сут	25,4 мин		акт	43 (10)	
¹⁰⁰ Fm	254	3,24 ч	20,1 ч		акт	76	
	255	20,1 ч	2,63 ч		дел	3400 (170)	
					акт	26 (3)	
	256	2,63 ч	100,5 сут		погл	3426 (170)	
	257	100,5 сут	0,38 мс		акт	45	
					дел	2950 (160)	
					акт погл	3150 6100 (600)	5000

*1 Ранее принимали величину $312 \cdot 10^{-24} \text{ см}^2$.
*2 Ранее принимали величину $1420 \cdot 10^{-24} \text{ см}^2$.
*3 Ранее принимали величину 0,9663.

Фактор Весткотта g характеризует степень отклонения энергетической зависимости сечения $\sigma(E)$ от закона $1/v$ и определяется из соотношения

$$g = \frac{\int_0^{\infty} \frac{\sigma(E)}{\sigma^0} \sqrt{\frac{E}{E_T}} N(E) dE}{\int_0^{\infty} N(E) dE} = \frac{2}{\sqrt{\pi} \sigma^0 E_T} \int_0^{\infty} \sigma(E) E \exp\left(-\frac{E}{E_T}\right) dE, \quad (6.1)$$

где $N(E)$ — спектр Максвелла по плотности тепловых нейтронов; σ^0 — сечение для нейтронов с энергией $E_T = 0,0253 \text{ эВ}$.

Резонансные интегралы реакции типа x от энергии E_c определяются из соотношения

$$I_x = \int_{E_c}^{\infty} \sigma_x(E) dE / E. \quad (6.2)$$

Усредненные сечения захвата для нейтронов разных энергий для основных легких ядер, 10^{-24} см^2 [б] [140]

Энергия, эВ	¹ H	⁶ Li	⁷ Li	¹⁰ B	¹¹ B	²³ Na	²⁷ Al	Si
1,0-5-1,0-2*	1,02+0	1,19-1	1,40-1	1,54+0	1,54-2	1,63+0	7,19-1	5,27-1
1,0-2-1,5-2	4,77-1	5,52-2	6,49-2	7,17-1	7,18-3	7,59-1	3,33-1	2,44-1
1,5-2-2,0-2	4,01-1	4,66-2	5,47-2	6,06-1	6,05-3	6,39-1	2,80-1	2,06-1
2,0-2-3,0-2	3,37-1	3,91-2	4,59-2	5,08-1	5,08-3	5,35-1	2,35-1	1,73-1
3,0-2-4,0-2	2,84-1	3,29-2	3,87-2	4,27-1	4,28-3	4,51-1	1,99-1	1,46-1
4,0-2-5,0-2	2,50-1	2,90-2	3,41-2	3,76-1	3,77-3	3,98-1	1,75-1	1,28-1
5,0-2-6,0-2	2,26-1	2,63-2	3,08-2	3,40-1	3,41-3	3,60-1	1,58-1	1,16-1
6,0-2-8,0-2	2,01-1	2,33-2	2,74-2	3,02-1	3,02-3	3,19-1	1,40-1	1,03-1
8,0-2-1,0-1	1,77-1	2,05-2	2,41-2	2,66-1	2,66-3	2,81-1	1,23-1	9,08-2
1,0-1-1,5-1	1,51-1	1,74-2	2,05-2	2,26-1	2,27-3	2,39-1	1,05-1	7,74-2
1,5-1-2,0-1	1,27-1	1,47-2	1,73-2	1,90-1	1,91-3	2,02-1	8,88-2	6,52-2
2,0-1-3,0-1	1,06-1	1,23-2	1,45-2	1,60-1	1,60-3	1,69-1	7,47-2	5,46-2
3,0-1-4,0-1	8,98-2	1,04-2	1,22-2	1,35-1	1,35-3	1,42-1	6,29-2	4,60-2
4,0-1-5,0-1	7,91-2	9,21-3	1,08-2	1,18-1	1,19-3	1,25-1	5,53-2	4,06-2
5,0-1-6,0-1	7,14-2	8,30-3	9,75-3	1,07-1	1,07-3	1,14-1	5,01-2	3,67-2
6,0-1-8,0-1	6,35-2	7,37-3	8,65-3	9,54-2	9,56-4	1,01-1	4,43-2	3,26-2
8,0-1-1,0+0	5,60-2	6,49-3	7,62-3	8,39-2	8,42-4	8,90-2	3,91-2	2,87-2
1,0+0-1,5+0	4,77-2	5,53-3	6,49-3	7,15-2	7,17-4	7,59-2	3,33-2	2,44-2
1,5+0-2,0+0	4,01-2	4,66-3	5,47-3	6,02-2	6,05-4	6,39-2	2,81-2	2,06-2
2,0+0-3,0+0	3,36-2	3,90-3	4,59-3	5,04-2	5,08-4	5,38-2	2,36-2	1,73-2
3,0+0-4,0+0	2,84-2	3,29-3	3,87-3	4,25-2	4,28-4	4,54-2	1,99-2	1,46-2
4,0+0-5,0+0	2,50-2	2,90-3	3,41-3	3,74-2	3,77-4	3,99-2	1,75-2	1,28-2
5,0+0-6,0+0	2,26-2	2,62-3	3,08-3	3,38-2	3,41-4	3,62-2	1,58-2	1,16-2
6,0+0-8,0+0	2,00-2	2,32-3	2,74-3	3,00-2	3,02-4	3,21-2	1,41-2	1,03-2
8,0+0-1,0+1	1,77-2	2,06-3	2,41-3	2,64-2	2,66-4	2,83-2	1,24-2	9,08-3
1,0+1-1,5+1	1,50-2	1,75-3	2,05-3	2,25-2	2,27-4	2,42-2	1,05-2	7,74-3
1,5+1-2,0+1	1,26-2	1,47-3	1,73-3	1,90-2	1,91-4	2,05-2	8,90-3	6,52-3
2,0+1-3,0+1	1,06-2	1,23-3	1,45-3	1,59-2	1,60-4	1,73-2	7,46-3	5,46-3
3,0+1-4,0+1	8,98-3	1,04-3	1,22-3	1,34-2	1,35-4	1,47-2	6,29-3	4,60-3
4,0+1-5,0+1	7,91-3	9,17-4	1,08-3	1,18-2	1,19-4	1,30-2	5,54-3	4,06-3
5,0+1-6,0+1	7,15-3	8,29-4	9,75-4	1,06-2	1,07-4	1,18-2	5,00-3	3,67-3
6,0+1-8,0+1	6,35-3	7,39-4	8,65-4	9,47-3	9,56-5	1,06-2	4,45-3	3,26-3
8,0+1-1,0+2	5,60-3	6,50-4	7,62-4	8,34-3	8,42-5	9,54-3	3,91-3	2,87-3
1,0+2-1,5+2	4,76-3	5,52-4	6,49-4	7,09-3	7,17-5	8,30-3	3,47-3	2,44-3
1,5+2-2,0+2	4,01-3	4,66-4	5,47-4	5,98-3	6,05-5	7,25-3	3,11-3	2,06-3
2,0+2-3,0+2	3,36-3	3,91-4	4,59-4	5,01-3	5,08-5	6,47-3	2,79-3	1,73-3
3,0+2-4,0+2	2,83-3	3,30-4	3,87-4	4,22-3	4,28-5	5,88-3	2,51-3	1,46-3
4,0+2-5,0+2	2,49-3	2,90-4	3,41-4	3,73-3	3,77-5	5,65-3	2,32-3	1,28-3
5,0+2-6,0+2	2,25-3	2,63-4	3,08-4	3,36-3	3,41-5	5,57-3	2,18-3	1,16-3
6,0+2-8,0+2	1,99-3	2,32-4	2,74-4	2,99-3	3,02-5	5,71-3	2,02-3	1,03-3
8,0+2-1,0+3	1,76-3	2,05-4	2,41-4	2,63-3	2,66-5	6,13-3	1,87-3	9,08-4
1,0+3-1,5+3	1,50-3	1,74-4	2,05-4	2,23-3	2,27-5	7,89-3	2,03-3	7,74-4
1,5+3-2,0+3	1,28-3	1,47-4	1,73-4	1,88-3	1,92-5	1,46-2	2,51-3	6,52-4
2,0+3-3,0+3	1,07-3	1,23-4	1,45-4	1,58-3	1,61-5	1,46-1	3,23-3	5,46-4
3,0+3-4,0+3	9,01-4	1,04-4	1,22-4	1,33-3	1,36-5	3,79-2	4,18-3	4,60-4
4,0+3-5,0+3	7,88-4	9,18-5	1,08-4	1,17-3	1,20-5	3,79-3	5,14-3	1,37-2
5,0+3-6,0+3	7,02-4	8,30-5	9,75-5	1,06-3	1,09-5	1,29-3	5,13-2	7,85-4
6,0+3-8,0+3	6,14-4	7,37-5	8,65-5	9,41-4	9,76-6	1,55-3	5,87-3	4,26-4
8,0+3-1,0+4	5,30-4	6,49-5	7,62-5	8,29-4	8,61-6	2,00-4	3,80-3	3,70-4
1,0+4-1,5+4	4,37-4	5,53-5	6,49-5	7,07-4	7,14-5	8,00-5	3,15-3	3,62-4
1,5+4-2,0+4	3,55-4	4,66-5	5,47-5	5,95-4	6,02-5	3,48-5	2,90-3	1,22-3
2,0+4-3,0+4	2,84-4	3,91-5	4,59-5	4,99-4	5,06-5	2,22-5	3,27-3	2,21-4
3,0+4-4,0+4	2,25-4	3,29-5	3,87-5	4,19-4	4,55-6	4,13-3	1,55-2	2,33-3
4,0+4-5,0+4	1,91-4	2,90-5	3,41-5	3,70-4	3,93-6	1,54-4	2,97-3	5,65-4
5,0+4-6,0+4	1,66-4	2,62-5	3,08-5	3,34-4	3,49-6	3,63-3	1,17-3	2,27-2
6,0+4-8,0+4	1,40-4	2,33-5	2,74-5	2,96-4	3,12-6	4,73-5	1,10-3	7,97-4
8,0+4-1,0+5	1,17-4	2,05-5	2,41-5	2,61-4	2,77-6	1,48-5	3,26-3	9,10-4

* Следует читать как $1,0 \cdot 10^{-5} - 1,0 \cdot 10^{-2}$.

Таблица 6.4

Усредненные сечения захвата для нейтронов разных энергий для основных конструкционных материалов, 10^{-24} см² [6] [140]

Энергия, эВ	Cr	⁵⁵ Mn	Fe	⁵⁹ Co	Ni	⁹³ Nb	Mo	¹⁸¹ Ta
1,0-5-1,0-2	9,52+0	4,11+1	9,42+0	1,15+2	1,37+1	3,56+0	7,90+0	6,52+1
1,0-2-1,5-2	4,42+0	1,91+1	3,77+0	5,33+1	6,36+0	1,66+0	3,67+0	3,03+1
1,5-2-2,0-2	3,72+0	1,61+1	3,09+0	4,51+1	5,35+0	1,39+0	3,08+0	2,56+1
2,0-2-3,0-2	3,12+0	1,35+1	2,56+0	3,77+1	4,50+0	1,17+0	2,59+0	2,15+1
3,0-2-4,0-2	2,63+0	1,14+1	2,18+0	3,19+1	3,78+0	9,86-1	2,18+0	1,81+1
4,0-2-5,0-2	2,32+0	1,00+1	1,92+0	2,80+1	3,35+0	8,67-1	1,92+0	1,60+1
5,0-2-6,0-3	2,10+0	9,06+0	1,73+0	2,53+1	3,01+0	7,83-1	1,74+0	1,45+1
6,0-2-8,0-2	1,86+0	8,03+0	1,55+0	2,25+1	2,68+0	6,96-1	1,64+0	1,30+1
8,0-2-1,0-1	1,64+0	7,10+0	1,36+0	1,98+1	2,37+0	6,12-1	1,36+0	1,15+1
1,0-1-1,5-1	1,39+0	6,03+0	1,17+0	1,69+1	2,01+0	5,23-1	1,15+0	9,90+0
1,5-1-2,0-1	1,18+0	5,10+0	9,76-1	1,42+1	1,69+0	4,39-1	9,70-1	8,45+0
2,0-1-3,0-1	9,86-1	4,27+0	8,07-1	1,19+1	1,42+0	3,68-1	8,10-1	7,26+0
3,0-1-4,0-1	8,33-1	3,61+0	6,91-1	1,00+1	1,20+0	3,10-1	6,81-1	6,30+0
4,0-1-5,0-1	7,32-1	3,17+0	6,06-1	8,89+0	1,05+0	2,72-1	5,97-1	5,75+0
5,0-1-6,0-1	6,62-1	2,87+0	5,50-1	8,08+0	9,56-1	2,46-1	5,37-1	5,37+0
6,0-1-8,0-1	5,88-1	2,55+0	4,88-1	7,16+0	8,47-1	2,18-1	4,75-1	5,03+0
8,0-1-1,0+1	5,18-1	2,25+0	4,29-1	6,32+0	7,45-1	1,91-1	4,15-1	4,82+0
1,0+0-1,5+0	4,42-1	1,92+0	3,77-1	5,41+0	6,36-1	1,62-1	3,50-1	4,81+0
1,5+0-2,0+0	3,72-1	1,62+0	3,09-1	4,57+0	5,35-1	1,36-1	2,90-1	5,42+0
2,0+0-3,0+0	3,12-1	1,36+0	2,56-1	3,87+0	4,50-1	1,12-1	2,39-1	8,80+0
3,0+0-4,0+0	2,63-1	1,15+0	2,18-1	3,29+0	3,78-1	9,33-2	1,97-1	5,42+1
4,0+0-5,0+0	2,32-1	1,02+0	1,92-1	2,94+0	3,34-1	8,09-2	1,71-1	1,89+3
5,0+0-6,0+0	2,10-1	9,31-1	1,73-1	2,68+0	3,01-1	7,19-2	1,53-1	1,37+1
6,0+0-8,0+0	1,86-1	8,31-1	1,55-1	2,42+0	2,68-1	6,26-2	1,38-1	3,44+0
8,0+0-1,0+1	1,64-1	7,38-1	1,36-1	2,19+0	2,37-1	5,35-2	1,30-1	1,02+1
1,0+1-1,5+1	1,39-1	6,40-1	1,17-1	1,94+0	2,01-1	4,34-2	1,05+0	1,79+2
1,5+1-2,0+1	1,18-1	5,52-1	9,76-2	1,74+0	1,69-1	3,45-2	1,23-1	1,48+0
2,0+1-3,0+1	9,83-2	4,81-1	8,07-2	1,62+0	1,42-1	2,79-2	1,64-1	6,47+1
3,0+1-4,0+1	8,25-2	4,27-1	6,91-2	1,61+0	1,20-1	6,45-1	6,29-1	2,65+2
4,0+1-5,0+1	7,30-2	3,98-1	6,06-2	1,71+0	1,05-1	4,31-1	7,17+1	6,90+0
5,0+1-6,0+1	6,58-2	3,80-1	5,50-2	1,93+0	9,56-2	1,50-2	5,12-1	1,69+0
6,0+1-8,0+1	5,77-2	3,69-1	4,88-2	2,60+0	8,47-2	1,21-2	2,03+0	3,37+1
8,0+1-1,0+2	5,13-2	3,73-1	4,29-2	4,98+0	7,45-2	3,74-1	1,13-1	5,99+1
1,0+2-1,5+2	4,34-2	4,16-1	3,77-2	1,41+2	6,36-2	1,51+0	7,07+0	3,62+1
1,5+2-2,0+2	3,66-2	5,78-1	3,09-2	4,96+0	5,35-2	7,05+0	6,37-1	2,98+1
2,0+2-3,0+2	3,08-2	2,21+0	2,56-2	4,85-1	4,51-2	2,04-1	5,46-1	2,58+1
3,0+2-4,0+2	2,61-2	2,24+1	2,18-2	1,20-1	3,80-2	4,80+0	2,32+0	1,62+1
4,0+2-5,0+2	2,32-2	8,28-1	1,92-2	5,74-2	3,37-2	3,59-1	3,13+0	1,72+1
5,0+2-6,0+2	2,13-2	2,16-1	1,77-2	3,52-2	3,07-2	2,27-1	1,15+0	1,17+1
6,0+2-8,0+2	1,90-2	1,06-1	1,62-2	2,20-2	2,74-2	1,56+0	1,32+0	9,45+0
8,0+2-1,0+3	1,81-2	1,50-1	1,53-2	1,44-2	2,44-2	1,45+0	8,20-1	1,03+1
1,0+3-1,5+3	1,72-2	2,22+0	3,84-1	2,50-2	3,03-2	2,45+0	7,57-1	1,09+1
1,5+3-2,0+3	2,66-1	1,27-1	1,15-2	8,70-3	1,86-2	1,41+0	7,09-1	8,30+0
2,0+3-3,0+3	2,14-2	4,01-1	7,39-3	8,23-2	5,12-2	1,64+0	6,39-1	6,00+0
3,0+3-4,0+3	4,66-2	2,87-2	6,21-3	7,56-2	2,03-2	1,13+0	6,10-1	4,58+0
4,0+3-5,0+3	6,48-2	8,94-3	5,60-3	3,36-1	3,38-2	7,12-1	5,48-1	3,73+0
5,0+3-6,0+3	1,23-1	8,15-3	6,18-3	1,43-1	3,25-2	1,03+0	4,87-1	3,10+0
6,0+3-8,0+3	7,11-2	6,15-2	2,45-2	7,48-2	1,97-2	8,22-1	4,02-1	2,54+0
8,0+3-1,0+4	3,29-2	1,03-1	1,66-2	1,82-1	2,41-2	6,52-1	3,79-1	2,08+0
1,0+4-1,5+4	6,55-3	7,92-2	8,69-3	6,77-2	1,28-1	5,40-1	2,83-1	1,67+0
1,5+4-2,0+4	5,79-3	8,48-2	1,97-3	6,35-2	8,12-2	4,30-1	2,39-1	1,29+0
2,0+4-3,0+4	1,80-2	6,21-2	1,76-2	4,58-2	3,76-2	3,38-1	1,99-1	9,59-1
3,0+4-4,0+4	1,67-2	4,59-2	1,72-2	3,31-2	2,13-2	2,64-1	1,60-1	7,69-1
4,0+4-5,0+4	1,24-2	3,17-2	5,34-3	3,18-2	2,27-2	2,18-1	1,30-1	6,58-1
5,0+4-6,0+4	1,43-2	3,10-2	1,78-2	3,04-2	1,86-2	1,81-1	1,13-1	5,63-1
6,0+4-8,0+4	5,16-3	2,45-2	7,37-3	1,85-2	2,24-2	1,51-1	9,60-2	4,98-1
8,0+4-1,0+5	9,64-3	2,06-2	1,69-2	1,90-2	2,08-2	1,26-1	8,17-2	4,45-1
1,0+5-1,5+5	1,06-2	1,61-2	8,20-3	1,43-2	1,86-2	1,02-1	6,89-2	3,90-1

Продолжение табл. 6.4

Энергия, эВ	Cr	⁵⁵ Mn	Fe	⁵⁹ Co	Ni	⁹³ Nb	Mo	¹⁸¹ Ta
1,5+5-2,0+5	5,01-3	1,22-2	7,16-3	1,26-2	1,43-2	8,34-2	6,03-2	3,04-1
2,0+5-3,0+5	4,16-3	8,23-3	6,67-3	1,03-2	1,13-2	7,18-2	5,60-2	2,54-1
3,0+5-4,0+5	4,00-3	5,70-3	5,61-3	8,73-3	1,04-2	6,44-2	4,47-2	2,09-1
4,0+5-5,0+5	3,84-3	4,60-3	5,94-3	9,36-3	9,78-3	6,11-2	4,31-2	1,87-1
5,0+5-6,0+5	3,72-3	4,02-3	6,13-3	7,64-3	9,53-3	5,95-2	4,12-2	1,63-1
6,0+5-8,0+5	3,84-3	3,43-3	6,01-3	6,80-3	9,36-3	5,79-2	3,60-2	1,48-1
8,0+5-1,0+6	3,91-3	3,01-3	4,08-3	7,33-3	9,32-3	5,03-2	2,78-2	1,32-1
1,0+6-1,5+6	4,09-3	2,52-3	2,42-3	7,74-3	9,14-3	2,91-2	2,23-2	9,15-2
1,5+6-2,0+6	3,55-3	2,09-3	2,30-3	5,13-3	5,87-3	1,88-2	1,89-2	5,17-2
2,0+6-3,0+6	2,75-3	1,74-3	2,09-3	3,87-3	4,62-3	7,04-3	1,35-2	2,76-2
3,0+6-4,0+6	1,90-3	1,40-3	1,83-3	3,20-3	2,98-3	3,85-3	8,75-3	1,19-2
4,0+6-5,0+6	1,31-3	1,13-3	1,48-3	2,75-3	1,90-3	2,32-3	4,12-3	4,80-3
5,0+6-6,0+6	7,66-4	9,54-4	1,06-3	2,45-3	1,26-3	1,44-3	1,81-3	1,78-3
6,0+6-8,0+6	4,28-4	7,76-4	6,49-4	1,86-3	8,21-4	1,01-3	1,43-3	1,30-3
8,0+6-1,0+7	3,62-4	6,26-4	4,90-4	6,90-4	5,22-4	1,54-3	1,54-3	1,54-3
1,0+7-1,5+7	6,51-4	7,08-4	6,51-4	8,10-4	6,51-4	1,49-3	1,49-3	1,49-3

Таблица 6.2 составлена по данным [141], периоды полураспада и цепочки распада приняты по справочнику [37], энергетический спектр фотонов образующихся радионуклидов можно принять по данным табл. 2.2 или из справочника [35, 36]. Ссылки на литературу опущены, их можно найти в [141].

Приведенных в табл. 6.1 и 6.2 данных часто бывает достаточно для многих практических задач реакторов на тепловых нейтронах, где спектр нейтронов имеет максвелловское распределение в диапазоне энергий до 1 эВ, а при больших энергиях убывает по закону $1/E$ (табл. 6.2). Однако для некоторых других ядерно-энергетических установок, например реакторов на быстрых нейтронах, где нейтроны сосредоточены при энергиях примерно 1 кэВ — 1 МэВ, необходимо знать нейтронные сечения в широком диапазоне энергий — от тепловых примерно до 20 МэВ [140]. Усредненные сечения захвата для таких энергий приведены в многогрупповом представлении по [140] в табл. 6.3 и 6.4. Внутри выделенных энергетических интервалов сечения усреднены с единичной весовой функцией.

Подробная информация о групповых константах взаимодействия нейтронов с веществом и библиотеках для расчетов полей излучений приводится в [142—144]. На рис. 6.1—6.4 показаны полные сечения взаимодействия нейтронов для ряда сред [145].

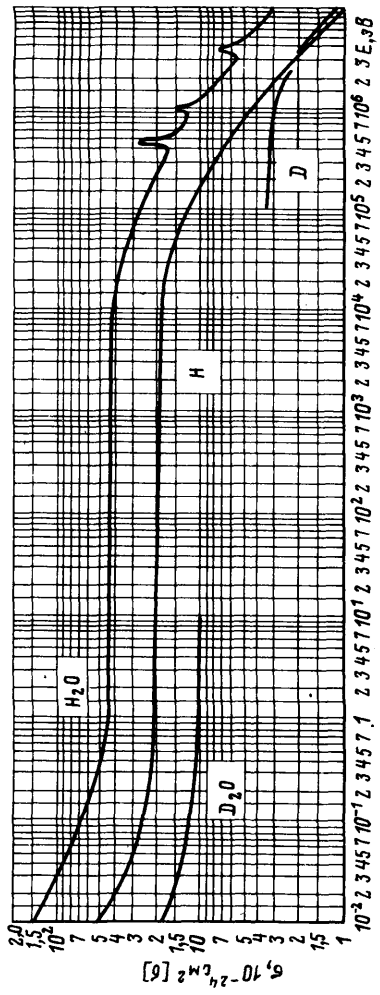


Рис. 6.1. Зависимость полного сечения взаимодействия нейтронов для ^1H , ^2D , H_2O и D_2O от энергии

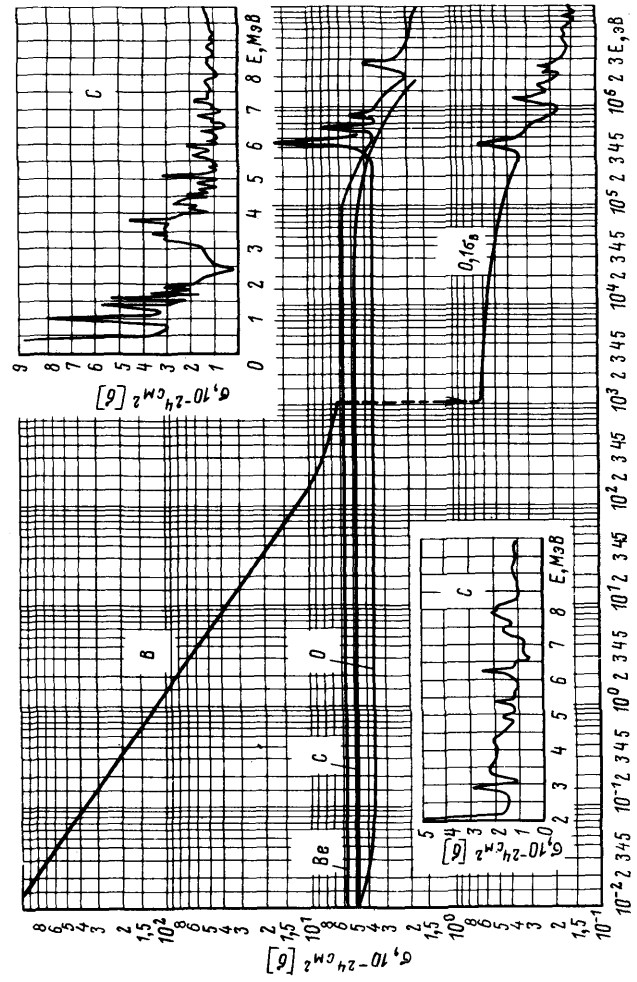


Рис. 6.2. Зависимость полного сечения взаимодействия нейтронов для Be, V, C и O от энергии

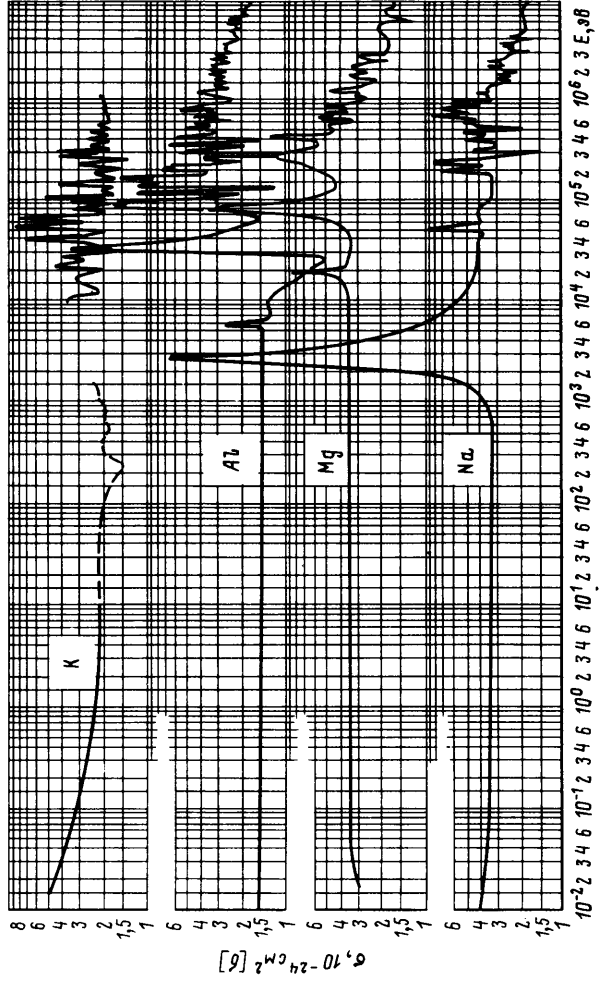


Рис. 6.3. Зависимость полного сечения взаимодействия нейтронов для Na, Mg, Al и K от энергии

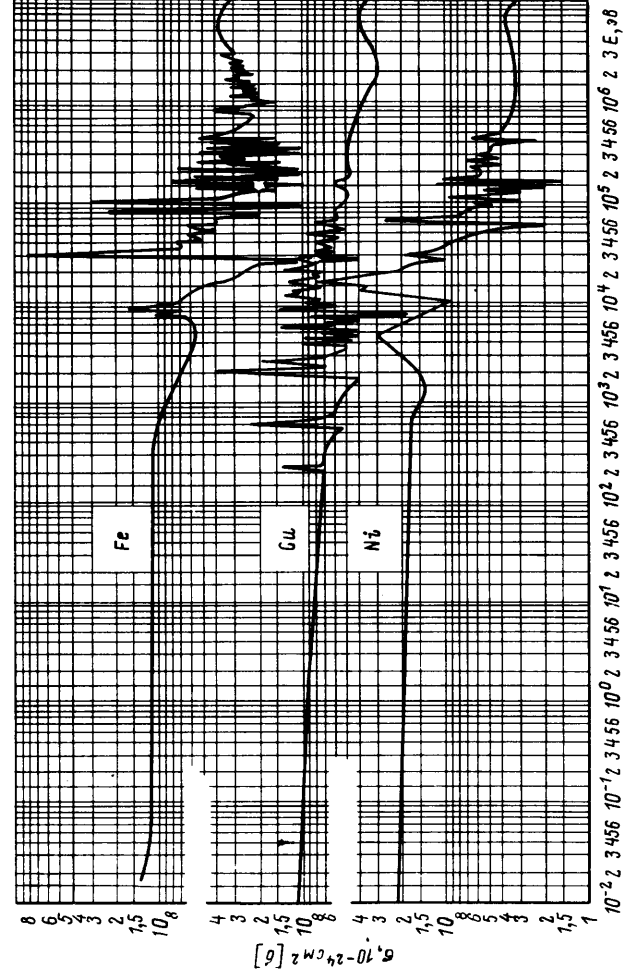


Рис. 6.4. Зависимость полного сечения взаимодействия нейтронов для Fe, Ni, Cu от энергии

§ 6.2. ПРОСТРАНСТВЕННО-ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ НЕЙТРОНОВ В РАЗЛИЧНЫХ СРЕДАХ

В табл. 6.5 и на рис. 6.5, 6.6 представлены пространственно-энергетические распределения нейтронов источника деления в различных средах; подобная информация для точечных изотропных моноэнергетических источников в воде показана на рис. 6.7.

Исходя из известных распределений $\varphi(d, E, E_0)$ для набора моноэнергетических излучателей с энергией E_0 , можно рассчитать пространственно-энергетическое распределение нейтронов $\varphi[d, E, S(E_0)]$ для источника произвольного энергетического распределения излучения вида $S(E_0)$ по формуле

$$\varphi[d, E, S(E_0)] = \int \varphi(d, E, E_0) S(E_0) dE_0 \quad (6.3)$$

спектр источника

В виде примера таких расчетов на рис. 6.8 приведены пространственно-энергетические распределения нейтронов в воде для источника

Таблица 6.5

Пространственно-энергетические распределения нейтронов для изотропных источников нейтронов деления в различных бесконечных средах [данные рассчитаны методом моментов и нормированы на мощность источника 1 нейтр./с, кроме расчетов для плоского источника в углероде, где мощность источника соответствовала 1 нейтр./ $(\text{см}^2 \cdot \text{с})$]*¹

E, МэВ	d, см				
	10	20	30	60	90
$4\pi d^2 \varphi(d, E)$ (нейтр./$(\text{с} \cdot \text{МэВ})$) для точечного источника в водороде ($\rho = 0,111 \text{ г/см}^3$) [46]					
18,017	1,05—6	6,58—7	4,42—7	1,32—7	4,22—8
13,348	4,35—5	2,81—5	1,82—5	4,96—6	1,38—6
8,947	1,17—3	6,31—4	3,43—4	5,65—5	9,78—6
5,997	7,81—3	3,94—3	1,79—3	1,85—4	2,15—5
3,824	3,26—2	1,25—2	4,78—3	3,39—4	3,20—5
1,555	1,05—1	3,59—2	1,17—2	5,91—4	5,53—5
0,7344	1,60—1	5,70—2	1,93—2	8,18—4	6,98—5
0,33	2,22—1	8,27—2	2,95—2	1,10—3	8,35—5

E, МэВ	d, г/см ²						
	0	10	20	30	60	90	120
$4\pi d^2 \varphi(d, E)$ (нейтр./$(\text{с} \cdot \text{МэВ})$) для точечного источника в воде*² [146]							
10,9	4,64—4	2,02—4	8,77—5	3,79—5	3,01—6	2,35—7	1,82—8
6,0	1,91—2	7,54—3	2,90—3	1,10—3	5,79—5	3,07—6	1,68—7
2,7	1,65—1	5,86—2	1,62—2	4,37—3	1,07—4	4,14—6	2,16—7
1,1	3,37—1	1,20—1	3,14—2	6,70—3	1,47—4	5,62—6	2,99—7
0,33	3,15—1	2,37—1	5,06—2	1,20—2	3,26—4	1,01—5	5,37—7

E, МэВ	d, г/см ²						
	0	10	20	30	60	90	120
$4\pi d^2 \varphi(d, E)$ (нейтр./$(\text{с} \cdot \text{МэВ})$) для точечного источника в бериллии [147]							
18,0	1,47—6	9,16—7	4,17—7	2,31—7	3,75—8	5,63—9	8,34—10
14,75	2,17—5	1,51—5	9,43—6	5,93—6	1,19—6	2,15—7	3,61—8

Продолжение табл. 6.5

E, МэВ	d, г/см ²						
	0	10	20	30	60	90	120
12,1	1,87—4	1,42—4	7,12—5	4,13—5	7,65—6	1,22—6	1,84—7
9,89	1,05—3	8,53—4	4,55—4	2,72—4	5,14—5	8,07—6	1,18—6
8,10	4,12—3	3,12—3	1,56—3	8,93—4	1,50—4	2,16—5	2,97—6
6,63	1,22—2	8,20—3	4,02—3	2,29—3	3,51—4	4,50—5	5,60—6
5,43	2,85—2	2,28—2	1,18—2	6,64—3	9,65—4	1,18—4	1,40—5
4,44	5,58—2	4,42—2	2,23—2	1,22—2	1,62—3	1,83—4	2,05—5
3,64	9,36—2	6,10—2	2,84—2	1,50—2	1,78—3	1,81—4	1,88—5
2,98	1,40—1	7,45—2	2,74—2	1,28—2	1,29—3	1,21—4	1,23—5
2,69	1,65—1	8,64—2	2,70—2	1,10—2	9,19—4	8,13—5	8,31—6
2,44	1,90—1	1,42—1	6,72—2	3,18—2	2,51—3	1,83—4	1,54—5
2,00	2,38—1	1,92—1	1,07—1	6,09—2	7,82—3	7,68—4	6,81—5
1,63	2,80—1	2,25—1	1,28—1	7,41—2	1,00—2	1,03—3	9,44—5
1,34	3,14—1	2,58—1	1,40—1	7,76—2	9,69—3	9,69—4	8,84—5
1,10	3,37—1	2,62—1	1,29—1	6,62—2	7,44—3	7,30—4	6,65—5
0,734	3,56—1	3,12—1	1,33—1	5,78—2	5,12—3	4,84—4	4,38—5
0,601	3,53—1	1,99—1	7,46—1	3,13—2	2,59—3	2,42—4	2,19—5
0,572	3,51—1	2,77—1	1,06—1	4,21—2	3,23—3	2,97—4	2,69—5
0,492	3,44—1	2,76—1	1,02—1	3,88—2	2,65—3	2,38—4	2,15—5
0,445	3,38—1	3,30—1	1,28—1	4,69—2	2,89—3	2,52—4	2,27—5
0,383	3,27—1	2,91—1	1,11—1	3,95—2	2,21—3	1,89—4	1,69—5
0,330	3,15—1	2,73—1	1,03—1	3,57—2	1,82—3	1,52—4	1,35—5

$\varphi(d, E)$ (нейтр./ $(\text{см}^2 \cdot \text{с} \cdot \text{МэВ})$) для плоского источника в углероде [46]

18,02	—	6,45—7	3,13—7	1,58—7	3,00—8	1,02—8	4,59—9
12,08	—	8,33—5	4,08—5	2,08—5	3,94—6	1,33—6	6,02—7
8,10	—	1,51—3	6,39—4	2,86—4	4,44—5	1,44—5	5,98—6
5,43	—	1,58—2	8,38—3	4,58—3	9,66—4	3,23—4	1,44—4
3,64	—	4,68—2	2,19—2	1,06—2	1,71—3	5,21—4	2,26—4
2,44	—	1,75—1	8,83—2	4,59—2	8,43—3	2,50—3	1,01—3
1,63	—	3,41—1	1,82—1	9,96—2	2,03—2	6,07—3	2,37—3
1,1	—	5,31—1	2,93—1	1,65—1	3,60—2	1,09—2	4,18—3
0,73	—	7,52—1	4,23—1	2,44—1	5,52—2	1,68—2	6,43—3
0,49	—	8,51—1	4,85—1	2,82—1	6,54—2	2,01—2	7,65—3
0,33	—	7,36—1	4,18—1	2,42—1	5,58—2	1,72—2	6,60—3
0,221	—	9,97—1	5,69—1	3,32—1	7,78—2	2,41—2	9,19—3
0,148	—	1,44+0	8,38—1	4,97—1	1,20—1	3,71—2	1,41—2
0,099	—	2,11+0	1,25+0	7,55—1	1,88—1	5,88—2	2,21—2
0,066	—	3,12+0	1,89+0	1,16+0	3,00—1	9,47—2	3,54—2
0,012	—	1,40+1	9,07+0	5,93+0	1,76+0	5,89—1	2,21—1
$0,3 \cdot 10^{-5}$	—	4,82+4	3,63+4	2,74+4	1,19+4	5,28+3	2,38+3

$4\pi d^2 \varphi(d, E)$ (нейтр./ $(\text{с} \cdot \text{МэВ})$) для точечного источника в СН [46]

18,02	—	9,31—7	4,42—7	2,51—7	4,27—8	6,67—9	1,01—9
12,08	—	1,10—4	4,66—5	2,42—5	3,17—6	3,76—7	4,43—8
8,10	—	1,91—3	6,60—4	2,84—4	2,00—5	1,39—6	1,10—7
5,43	—	1,40—2	5,14—3	2,19—3	1,40—4	8,37—6	5,38—7
3,64	—	3,85—2	1,10—2	3,87—3	1,62—4	8,24—6	5,17—7
2,44	—	9,87—2	2,81—2	8,97—3	2,82—4	1,28—5	7,85—7
1,63	—	1,48—1	4,12—2	1,25—2	3,42—4	1,48—5	9,03—7
1,10	—	2,01—1	5,42—2	1,59—2	4,11—4	1,75—5	1,07—6
0,734	—	2,56—1	6,80—2	1,94—2	4,95—4	2,10—5	1,29—6

E, МэВ	d, г/см ²						
	0	10	20	30	60	90	120
0,492	—	2,98—1	7,88—2	2,21—2	5,64—4	2,39—5	1,46—6
0,33	—	3,71—1	9,90—2	2,72—2	6,96—4	2,93—5	1,78—6

4πd²φ(d, E) (нейтр./с·МэВ) для точечного источника в СН_{2,0} [46]

18,02	—	7,28—7	3,09—7	1,49—7	1,42—8	1,28—9	1,11—10
12,08	—	7,75—5	2,77—5	1,14—5	6,55—7	3,68—8	2,12—9
8,10	—	1,20—3	3,35—4	1,04—4	2,63—6	8,28—8	3,22—9
5,43	—	7,72—3	2,00—3	5,46—4	9,01—6	1,97—7	5,71—9
3,64	—	1,88—2	3,74—3	8,27—4	9,38—6	2,05—7	5,74—9
2,44	—	4,19—2	7,37—3	1,42—3	1,29—5	2,85—7	7,73—9
1,63	—	6,05—2	9,92—3	1,79—3	1,49—5	3,30—7	8,77—9
1,10	—	8,13—2	1,26—2	2,21—3	1,78—5	3,96—7	1,04—8
0,734	—	1,04—1	1,54—2	2,66—3	2,14—5	4,74—7	1,26—8
0,492	—	1,26—1	1,81—2	3,11—3	2,50—5	5,52—7	1,47—8
0,33	—	1,61—1	2,25—2	3,83—3	3,10—5	6,77—7	1,82—8

*¹ В таблице числа $a \pm b$ читать как $a \cdot 10^{\pm b}$.
 *² Расчет с точным учетом потерь при рассеянии на кислороде.

нейтронов деления во всем диапазоне изменения энергии детектируемых нейтронов. В области энергий $2 \text{ эВ} \leq E \leq 0,33 \text{ МэВ}$ эти распределения рассчитывали по формуле (6.3), исходя из данных [149] о пространственно-энергетическом распределении нейтронов моноэнергетических источников в воде, задаваемом формулой

$$\varphi(d, E, E_0) = \varphi(d, E = 0,33 \text{ МэВ}, E_0) \frac{\Sigma_H(0,33 \text{ МэВ})}{(E \Sigma_H(E))}, \quad (6.4)$$

где E — энергия нейтронов, МэВ; $\Sigma_H(E)$ и $\Sigma_H(0,33 \text{ МэВ})$ — макроскопическое полное сечение взаимодействия нейтронов на водороде при энергии E и $0,33 \text{ МэВ}$ соответственно; $\varphi(d, E = 0,33 \text{ МэВ}, E_0)$ определяется по данным рис. 6.7 для энергии $E = 0,33 \text{ МэВ}$. В области энергий $E > 0,33 \text{ МэВ}$ использованы данные рис. 6.6. При построении кривых энергетического распределения нейтронов в воде на рис. 6.8 в области энергий от тепловых до нескольких электрон-вольт использованы данные [150].

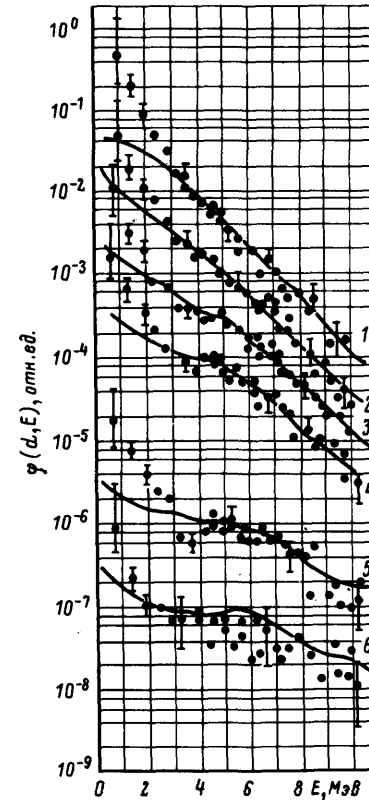


Рис. 6.5. Пространственно-энергетическое распределение нейтронов в полиэтилене:

● — нейтроны реактора, эксперимент [148]; — — нейтроны деления, расчет методом моментов $\varphi(d, E)$ для точечного изотропного источника, умноженный на $4\pi d^2$ [46] при d : 1 — 0 г/см²; 2 — 10 г/см²; 3 — 20 г/см²; 4 — 30 г/см²; 5 — 60 г/см²; 6 — 80 г/см².

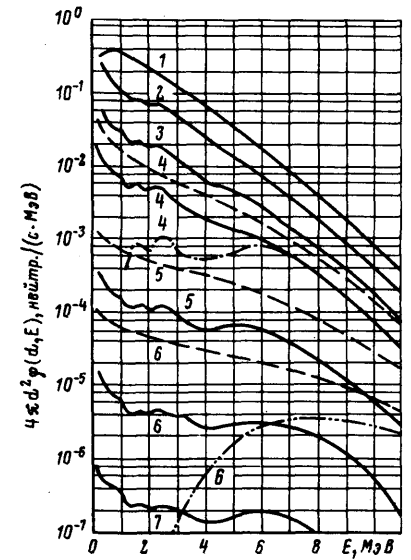


Рис. 6.6. Пространственно-энергетическое распределение нейтронов точечного изотропного источника нейтронов деления, испускающего 1 нейтр./с, в воде, $\rho = 1 \text{ г/см}^3$ (—) и водороде, $\rho = 0,111 \text{ г/см}^3$ (---); расчет методом моментов [46] при d :

1 — 0 см; 2 — 10 см; 3 — 20 см; 4 — 30 см; 5 — 60 см; 6 — 90 см; 7 — 120 см. Для оценки приведены: — . . — спектр нерассеянных нейтронов в водороде; — — спектр для коллимированного пучка реактора BSF (данные Cochran R. Henry K., 1953).

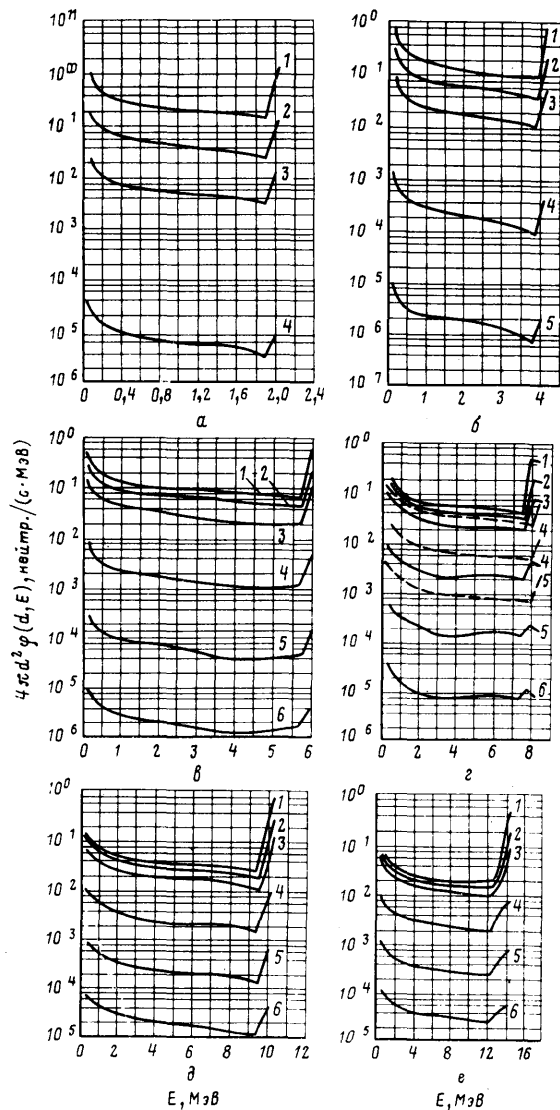


Рис. 6.7. Пространственно-энергетическое распределение нейтронов точечных изотропных моноэнергетических нейтронов, испускающих 1 нейтр./с с энергией: а — 2 МэВ; б — 4 МэВ; в — 6 МэВ; з — 8 МэВ; д — 10 МэВ; е — 14 МэВ в воде, $\rho = 1 \text{ г/см}^3$ (—) и водороде, $\rho = 0,111 \text{ г/см}^3$ (---) при d : 1 — 10 см; 2 — 20 см; 3 — 30 см; 4 — 60 см; 5 — 90 см; 6 — 120 см [46]. Для водорода показаны спектры рассеянного излучения

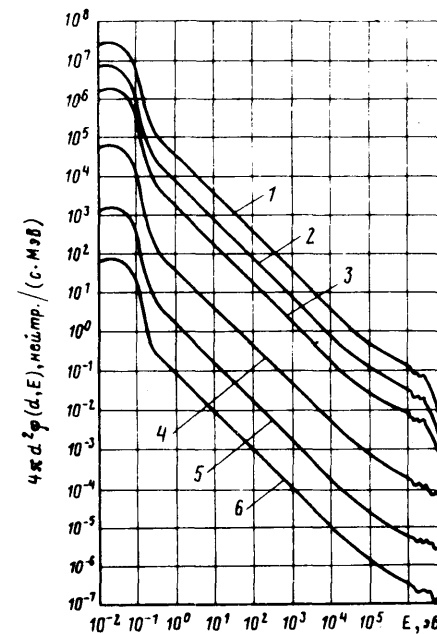


Рис. 6.8. Пространственно-энергетическое распределение нейтронов в воде от точечного изотропного источника нейтронов деления при d : 1 — 10 см; 2 — 20 см; 3 — 30 см; 4 — 60 см; 5 — 90 см; 6 — 120 см

Большая информация о пространственно-энергетическом распределении нейтронов водо-водяного исследовательского реактора в различных средах приведена в работе [148].

§ 6.3. УГЛОВЫЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ РАССЕЯННЫХ НЕЙТРОНОВ ЗА БАРЬЕРАМИ

Угловое распределение нейтронов за защитой исследовали многие авторы (см., например, [151—160]), подробный обзор приводится в [72, 78, 151]. В настоящем параграфе ограничимся рассмотрением углового распределения быстрых нейтронов плоского мононаправленного источника нейтронов реактора за защитой.

Угловое распределение плотности потока рассеянных быстрых нейтронов с энергией $E > (0,7-1,0) \text{ МэВ}$, отнесенное к единичному телесному углу, в диапазоне углов детектирования $(15 \div 20)^\circ \lesssim \theta \lesssim (75 \div 80)^\circ$ (θ — угол между нормалью к защите и направлением на детектор) аппроксимируется зависимостью вида

$$\varphi^{nm}(d, \theta, E) = C(d, E) \exp[-\theta/\theta^{nm}(d, E)] \quad (6.5)$$

где θ^{nm} — характеристический угол, зависящий в общем случае от толщины защиты d и энергии детектируемых нейтронов E ; начиная с

некоторой толщины защиты $d_{\text{мин}}$, большей 1—2 длин релаксации детектируемых нейтронов в среде, $\theta^{n,m}$ слабо зависит от d (табл. 6.6); $C(d, E)$ — нормировочный множитель.

Анализ данных табл. 6.6 позволяет заключить, что $\theta^{n,m} \approx (40 \div 60)^\circ$ — для водородосодержащих сред и $\theta^{n,m} \approx 30^\circ$ — для водородосодержащих сред.

Таблица 6.6

Значения характеристических углов $\theta^{n,m}$ для формулы (6.5) [158, 159] (источник нейтронов спектра реактора)

Материал	Плотность, г/см ³	Измеренная толщина защиты, см	E , МэВ	$\theta^{n,m}$, град
Гидрид лития	0,5	15—60	> 0,7	28 ± 2
Вода	1,0	15—45	> 0,7	30 ± 2
Оксид бериллия	2,8	15	> 1,0	44 ± 4
Карбид бора	1,1	20—50	> 1,0	40 ± 2
Вольфрам	17,4	6,6—15,4	> 1,0	38 ± 2
Алюминий	2,7	21	> 1,0	44 ± 2
Литий	0,53	60	> 1,0	40 ± 2
Свинец	11,3	12,5	> 1,0	38 ± 2*
Железо	7,8	20—40	> 1,0	48

* При выбранных поперечных размерах барьера не выполнялись условия бесконечности барьерной геометрии. Расчеты по программе РОЗ дают $\theta^{n,m} = 62^\circ$.

Значения $\theta^{n,m}$ существенно зависят от энергии детектируемых нейтронов. С уменьшением E угловые распределения становятся более изотропными, например для водородосодержащих сред при E вблизи области тепловых нейтронов $\theta^{n,m} \approx 100^\circ$ [159].

Множитель $C(d, E)$ можно определить из следующего нормировочного выражения:

$$\varphi(d, E) = \varphi_{\text{нр}}(d, E) [B_{\text{ч}}(d) - 1] = \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} C(d, E) \exp[-\theta/\theta^{n,m}(d, E)] \cdot \sin\theta d\theta, \quad (6.6)$$

где $\varphi(d, E)$, $\varphi_{\text{нр}}(d, E)$ — плотность потока рассеянных и нерассеянных нейтронов с энергией, большей E , за защитой толщиной d ; $B_{\text{ч}}(d)$ — числовой фактор накопления нейтронов данной энергетической группы для защиты толщиной d .

Из соотношения (6.6) определяем

$$C(d, E) = \frac{\varphi_{\text{нр}}(d, E) [B_{\text{ч}}(d) - 1]}{2\pi} \frac{1 + \left(\frac{1}{\theta^{n,m}(d, E)}\right)^2}{1 - \frac{1}{\theta^{n,m}(d, E)} e^{-\pi/2\theta^{n,m}(d, E)}} = \frac{\varphi(d, E)}{2\pi} \frac{1 + \left(\frac{1}{\theta^{n,m}(d, E)}\right)^2}{1 - \frac{1}{\theta^{n,m}(d, E)} e^{-\pi/2\theta^{n,m}(d, E)}}. \quad (6.7)$$

При углах детектирования $0^\circ \lesssim \theta \lesssim (80 \div 90)^\circ$ для нейтронов в энергетическом интервале ΔE при тех же условиях задачи с погрешностью 10—15 % [160]

$$\varphi^{n,m}(d, \theta, \Delta E) = C(d, \Delta E) \{A_1(d, \Delta E) \exp[-\theta/\theta_1^{n,m}(d, \Delta E)] + A_2(d, \Delta E) \exp[-\theta/\theta_2^{n,m}(d, \Delta E)]\}, \quad (6.8)$$

где $C(d, \Delta E)$ — нормировочный множитель; $A_1(d, \Delta E)$, $A_2(d, \Delta E)$ — численные параметры ($A_1 + A_2 = 1$); $\theta_1^{n,m}$ и $\theta_2^{n,m}$ — характеристические углы.

Таблица 6.7

Значения A_1 , $\theta_1^{n,m}$, $\theta_2^{n,m}$ для барьеров из различных материалов для нейтронов различных энергетических интервалов ΔE [151] (источники нейтронов спектра реактора)

Интервал энергий ΔE , МэВ	Характеристические углы, град.		A_1	Интервал энергий ΔE , МэВ	Характеристические углы, град.		A_1
	$\theta_1^{n,m}$	$\theta_2^{n,m}$			$\theta_1^{n,m}$	$\theta_2^{n,m}$	
Гидрид лития ($\rho = 0,5$ г/см³) $d^* = 40 \div 60$ см				Железо ($\rho = 7,86$ г/см³) $d^* = 20 \div 50$ см			
0,8—1,4	43,4	12,0	1,71	0,8—1,4	41,0	14,2	1,77
1,4—2,5	35,6	10,0	1,75	1,4—2,5	39,7	12,6	1,62
2,5—4,0	31,0	8,6	1,73	2,5—4,0	31,3	13,3	2,0
4,0—6,5	25,3	9,3	2,17	4,0—6,5	27,2	12,5	2,21
6,5—10,5	20,8	8,3	2,42	6,5—10,5	20,7	11,8	3,06
				10,5—14,0	17,3	8,5	1,84
Вода ($\rho = 1,0$ г/см³) $d^* = 45 \div 60$ см				Свинец ($\rho = 11,34$ г/см³) $d^* = 30 \div 50$ см			
0,8—1,4	53,7	15,5	3,43	0,8—1,4	85,0	18,3	1,29
1,4—2,5	27,8	12,5	3,80	1,4—2,5	57,5	16,3	1,45
2,5—4,0	21,0	7,0	1,55	2,5—4,0	56,0	15,6	1,32
4,0—6,5	23,8	6,5	1,70	4,0—6,5	30,4	13,2	1,74
6,5—10,5	17,8	18,0	1,86	6,5—10,5	22,8	7,2	1,33
				10,5—14,0	15,1	10,0	2,15
Карбид бора ($\rho = 1,3$ г/см³) $d^* = 30 \div 50$ см				Вольфрам ($\rho = 17,4$ г/см³) $d^* = 15 \div 20$ см			
0,1—0,2	61,4	22,0	1,82	0,8—1,4	60,0	12,7	1,43
0,2—0,4	62,6	21,0	1,86	1,4—2,5	31,3	11,1	1,97
0,4—0,8	63,0	20,4	1,74	2,5—4,0	24,5	10,5	2,36
0,8—1,4	58,7	16,0	1,62	4,0—6,5	20,0	7,8	2,33
1,4—2,5	54,5	14,3	1,62				
2,5—4,0	41,7	13,5	1,85				
4,0—6,5	36,0	10,0	1,75				
6,5—10,5	24,3	9,0	2,11				
10,5—14,0	18,0	8,5	2,60				

* d — диапазон исследованной толщины, для которой определены коэффициенты $\theta_1^{n,m}$, $\theta_2^{n,m}$, A_1 . При дальнейшем увеличении толщины защиты энергетическо-угловые распределения нейтронов слабо зависят от d .

Величины A_1 , A_2 , $\theta_1^{n,m}$ и $\theta_2^{n,m}$ в наиболее общем виде зависят для данного материала защиты от энергии детектируемого излучения ΔE и толщины защиты. Однако начиная с некоторой толщины защиты $d_{мин}$, A_1 , A_2 , $\theta_1^{n,m}$, $\theta_2^{n,m}$ слабо зависят от d (табл. 6.7). Величина d для большинства исследованных защитных материалов составляет примерно 20—50 см. Первый член формулы (6.8) описывает угловое распределение рассеянных нейтронов при $\theta \geq 20^\circ$, второй — вводит поправку на углы детектирования $\theta \lesssim 20^\circ$.

Нормировочный множитель $C(d, \Delta E)$ в формуле (6.8) можно определить так же, как и множитель $C(d, E)$ в формуле (6.5). Он оказывается равен:

$$C(d, \Delta E) = \frac{\varphi(d, \Delta E)}{2\pi} \left[\frac{A_1(d, \Delta E) \left[1 - \frac{1}{\theta_1^{n,m}(d, \Delta E)} e^{-\pi/20\theta_1^{n,m}(d, \Delta E)} \right]}{1 + \left(\frac{1}{\theta_1^{n,m}(d, \Delta E)} \right)^2} + \frac{A_2(d, \Delta E) \left[1 - \frac{1}{\theta_2^{n,m}(d, \Delta E)} e^{-\pi/20\theta_2^{n,m}(d, \Delta E)} \right]}{1 + \left(\frac{1}{\theta_2^{n,m}(d, \Delta E)} \right)^2} \right]^{-1} \quad (6.9)$$

§ 6.4. МЕТОД ДЛИН РЕЛАКСАЦИИ ДЛЯ РАСЧЕТОВ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ РАСПРЕДЕЛЕНИЙ НЕЙТРОНОВ

Анализ имеющейся в литературе экспериментальной и расчетной информации показывает, что пространственное распределение плотности потока (мощности дозы) нейтронов с достаточно хорошей для практических расчетов точностью после исключения геометрического ослабления удается описать простой экспоненциальной зависимостью вида

$$\varphi(d) = \varphi_0 \exp(-d/L), \quad (6.10)$$

где L — длина релаксации нейтронов в среде, в общем случае зависящая от энергии нейтронов источника, толщины материала, компоновки и геометрии защиты, энергии детектируемых нейтронов и других условий задачи.

В большинстве случаев L не зависит от толщины защиты лишь в определенном диапазоне изменения d . Поэтому длина релаксации определяется для отдельных участков защиты, в пределах которых ослабление нейтронов может быть описано экспоненциальной зависимостью с постоянным значением L . В таких случаях плотность потока (мощность дозы) нейтронов можно определить по формуле

$$\varphi(d) = \varphi_0 \exp\left(-\sum_{i=1}^m \Delta d_i / L_i\right), \quad (6.11)$$

где Δd_i — толщина защиты i -го участка, для которого длину релаксации можно принять равной L_i ; m — число участков, на которые разбита толщина защиты.

В настоящем параграфе в табл. 6.8—6.10 собраны опубликованные в литературе данные о длине релаксации L источников нейтронов деления (табл. 6.8), моноэнергетических и (α, n) -источников быстрых нейтронов (табл. 6.9) и источников нейтронов промежуточных энергий (табл. 6.10) в различных защитных материалах.

В табл. 6.8—6.10 длины релаксации, рассчитанные или измеренные в бесконечной или полубесконечной (источник на границе среды) геометриях, выделены жирным шрифтом в отличие от длин релаксации для барьерных геометрий, которые набраны обычным шрифтом.

Кроме того, в табл. 6.8—6.10 обозначено: d — толщина защиты, для которой приводятся значения L ; $1/v$ — измерения детектором, сечение которого изменяется по закону $1/v$ (v — скорость нейтронов); $1/v + Cd$ — измерения детектором $1/v$ в кадмии; $D_{6.ii}$ — доза быстрых нейтронов; D — полная доза.

В табл. 6.8 данные для энергетических диапазонов 0,7—1,5; 1,5—2,5; 2—10; 2,5—4; 3—10; 4—10; 5—10; 7—10 МэВ приведены в основном по данным [148]. Эти результаты получены из измеренных сцинтиляционных спектрометром с кристаллом стибьена спектров быстрых нейтронов в барьерной геометрии. Нижние границы энергетических групп 2—10; 3—10; 5—10; 7—10 МэВ соответствует эффективным энергетическим порогам измерений камерой деления с $^{232}\text{Th}(n, f)$ и пороговыми индикаторами по следующим реакциям: $^{32}\text{S}(n, p)^{32}\text{P}$ (или $^{31}\text{P}(n, p)^{31}\text{Si}$), $^{27}\text{Al}(n, p)^{27}\text{Mg}$ и $^{27}\text{Al}(n, \alpha)^{24}\text{Na}$ соответственно.

Если длины релаксации для энергетических интервалов 0,7—1,5; 1,5—2,5 и 7—10 МэВ приведены по данным [151], они соответствуют значениям энергетических интервалов 0,8—1,4; 1,4—2,5 и 6,5—10,5 МэВ соответственно.

В табл. 6.8 и 6.9 данные для энергетических групп >2 , >3 , >5 и >7 МэВ в большинстве случаев соответствуют экспериментальным значениям по измерению пороговыми детекторами по реакциям $^{232}\text{Th}(n, f)$, $^{32}\text{S}(n, p)^{32}\text{P}$ (или $^{31}\text{P}(n, p)^{31}\text{Si}$), $^{27}\text{Al}(n, p)^{27}\text{Mg}$ и $^{27}\text{Al}(n, \alpha)^{24}\text{Na}$ соответственно. Иногда эти данные получены из расчетов применительно к показаниям указанных выше детекторов.

В табл. 6.19 приведены характеристики часто используемых детекторов быстрых нейтронов, а на рис. 6.16 показана зависимость сечений пороговых индикаторов от энергии.

Для измерения потоков тепловых, медленных и резонансных нейтронов чаще других применяют пропорциональный борный счетчик (сечение изменяется по закону $1/v$) и активационные детекторы по реакциям $^{63}\text{Cu}(n, \gamma)^{64}\text{Cu}$ ($E_{\text{рез}} = 580 \text{ эВ}^*$); $^{115}\text{In}(n, \gamma)^{116}\text{In}$ ($E_{\text{рез}} = 1,46 \text{ эВ}^*$); $^{197}\text{Au}(n, \gamma)^{198}\text{Au}$ ($E_{\text{рез}} = 4,9 \text{ эВ}^*$); $^{127}\text{I}(n, \gamma)^{128}\text{I}$ ($E_{\text{рез}} = 20 \div 220 \text{ эВ}$); $^{164}\text{Dy}(n, \gamma)^{165}\text{Dy}$ ($E_{\text{рез}} = 54 \text{ эВ}^*$); $^{23}\text{Na}(n, \gamma)^{24}\text{Na}$ ($E_{\text{рез}} = 2900 \text{ эВ}^*$); $^{186}\text{W}(n, \gamma)^{187}\text{W}$ ($E_{\text{рез}} = 18,8 \text{ эВ}^*$).

Для устранения активации потоком тепловых нейтронов используют детекторы в кадмиевых фильтрах. При детектировании нейтронов узких энергетических групп применяют фильтры из материала самих резонансных детекторов.

Для значений длины релаксации, приведенных в каждой строке табл. 6.8—6.10, указаны ссылки на все использованные работы.

* Расположение главного резонансного пика.

Таблица 6.8.
Длина релаксации L нейтронов реактора или нейтронов деления для различных материалов, г/см²

Среда	d , г/см ²	Длина релаксации для плотности потока нейтронов с энергией E , МэВ, или для дозы быстрых нейтронов.										Литера- тура					
		$\frac{1}{v}$	$\frac{1}{v} + \frac{c}{v + Cd}$	$\frac{D_{0n}}{E} > 0,33$ (МэВ)	0,7— —1,5	1,5— —2,5	2—10	2,5—4,3—10	>3	4—10	5—10		>5	7—10	>7		
Алюминий	135																
	27,0—135																
Бериллий	0—16																
	120 200																
Бетон желез- зосерпенти- нитовый	0—100																
	100—200 200—340																
Бетон лимо- нитовый	0—340																
	54—216 216—229																
Бетон магни- зитовый*1	90—230	49,7															
	60—220	26,4															
Бетон обыч- ный*1	50—190																
	Бетон обыч- ный (мар- ки ПШ)																
Бетон обыч- ный (марки TSF)*2	0—460																
			См. рис. 6,9, 6,10														
Бетоны раз- ные*3	100 ÷ (300— 400) см																
	Бетоны раз- ные*5	До 100— 150 см															

Продолжение табл. 6.8.

Среда	d , г/см ²	Длина релаксации для плотности потока нейтронов с энергией E , МэВ, или для дозы быстрых нейтронов										Литера- тура					
		$\frac{1}{v}$	$\frac{1}{v} + \frac{c}{v + Cd}$	$\frac{D_{0n}}{E} > 0,33$ (МэВ)	0,7— —1,5	1,5— —2,5	2—10	>2	2,5—4,3—10	>3	4—10		5—10	>5	7—10	>7	
Бетон серпен- тинитовый	0—220	21,1															
	140—300	44,7															
Бетон хроми- товый (жест- ропрочный)*1	125—250	41,5															
	То же с до- бавкой 32 кг/м ³ бора*1																
То же с до- бавкой 65 кг/м ³ бора*1	125—250	41,5															
Бор Борид воль- фрама	0—480																
	0—220 10—30																
Борид титана Вода	30—60	7,4															
	60—100	8,7															
Вольфрам	0—100																
	0—230 40—270																
Вермикулит Гидрид лития	0—175																
	0—15																

Среда	d_s , г/см ²	Длина релаксации для плотности потока нейтронов с энергией E , МэВ, или для дозы быстрых нейтронов											Литера- тура
		$\frac{1}{v}$	$\frac{1}{v} + \frac{1}{C+d}$	$\frac{D_{0,n}}{E} > 0,33$ (МэВ)	$\frac{D_{0,n}}{E} > 0,33 - 1,5$ МэВ)	1,5 - 2,5	2 - 10	> 2	2,5 - 4,3 - 10	> 3	4 - 10 5 - 10	> 5	
Гидрид лития	15-30			4,7	4,7	4,8		4,7	4,95	5,35	5,75	6,4	148
	0-30 7,5-30			4,1 4,3	4,1 4,3	4,25		4,1 4,4	4,4	4,8	5,15	5,6 5,42	72, 148 151
Гидрид титана	0-140			14,2	14,4	16,3		15,1	17,0	18,0	18,2	19,1	148
	70-140			17,0	17,8	18,4		18,2	18,8	19,8	20,6	21,7	148
Гидрид циркония	140-230			21,4	21,8	22,3		21,4	21,8	21,4	23,1	24,1	148
	0-230			17,5	18,1	18,9		17,9	19,6	20,0	20,3	22,1	148
Гидрофлогопит	0-100			27,0	27,7	27,0		28,4	27,7	29,4	31,3	34,6	148
	100-200			29,0	29,0	30,7		29,7	32,0	32,3	34,6	36,5	148
Графит	200-325			34,9	33,9	37,8		34,5	37,2	37,8	38,4	40,8	148
	0-175			30,4	30,4	31,6		31,0	32,6	33,3	34,9	37,2	148
Железо	0-50			22,3	22,4	22,8		21,6	23,4	24,3	24,9	24,4	148
	50-100 100-150			17,0 18,4	17,5 19,7	18,9 20,0		16,1 18,7	20,9 21,7	23,0	23,0	20,0 21,7	148, 174 148, 174
Железородная среда	150-220			21,7	26,8*	24,6		25,4	26,4	26,4	27,8	25,6	148, 174, 175
	0-220 0-510 1410 700			20,6	24	20,4		20,5	22,9	24,2	25,0	22,7	46, 148, 46, 148, 176, 46
Железородная среда	79-390 10-15 д. с. п.			192		55,4		53,9	50,7	50,0	49,2	49,5	49,9 44 См. рис. 6,11
				См. рис. 6,11		59,5		47,2	52,4 47,9 См. рис. 6,11	48,8	47,9	27,1 26,6	177 151 178

Среда	d_s , г/см ²	Длина релаксации для плотности потока нейтронов с энергией E , МэВ, или для дозы быстрых нейтронов											Литера- тура	
		$\frac{1}{v}$	$\frac{1}{v} + \frac{1}{C+d}$	$\frac{D_{0,n}}{E} > 0,33$ (МэВ)	$\frac{D_{0,n}}{E} > 0,33 - 1,5$ МэВ)	1,5 - 2,5	2 - 10	> 2	2,5 - 4,3 - 10	> 3	4 - 10 5 - 10	> 5		7 - 10
Железородная среда (в основном Fe_2O_3)*7	80-260			54,6	36,2	52		36,2	38				39	180
	80-300			28,6	28,6	28,6		32,5	33,3				34,6	180
Железо с графитом	До 300-600			43	43,8	43		36,2	38,2				40,4	174
	37,4 % железа (в смеси за по объему)													
Железо с графитом (в смеси 50 % железа за по объему)	0-425			46,0	42,6	38,8		37,0	39,0	39,4	41,5	42,2	148	
	Камень баритсерпентиновый цементный			34,0	33,5	34,0		33,1	34,7	35,0	35,9	36,5	148	
Железородная среда	0-350			34,0	33,5	34,0		33,1	34,7	35,0	35,9	36,7	148	
				См. рис. 6,11		34,0		33,1	34,7	35,0	35,9	36,7	148	

Среда	d_s , г/см ²	Длина релаксации для плотности потока нейтронов с энергией E , МэВ, или для дозы быстрых нейтронов											Литера- тура	
		$\frac{1}{v}$	$\frac{1}{v} + \frac{1}{v} + \text{Cd}$	$\frac{D_{60}}{E} > 0,33$ МэВ)	$0,7 - 1,5$	$1,5 - 2,5$	$2 - 10$	$2,5 - 4$	$4 - 10$	$10 - 5$	$5 - 7$	$7 - 10$		> 7
Камень свинцово-баритовый цементный Карбид бора	0—520				45,3	48,0	46,3	47,6	46,3	48,1	49,5	50,5		148
	0—90 11—65 10,5—63,5 0—42,5 0—230 145 350 300	11,8			18,6 10 9,44 38,7	17,6 8,48 9,23 39,4	20,6	20,0 6,36 8,48 45,0	16,7	21,9	21,9	21,9	21,9	151, 161
Литий	0—50				18,2	20,7	20,7	19,1	20,7	22,8	24,3	23,5		148
	50—100 100—160 160—230 0—230 0—240 0—28				20,7 23,2 26,0 22,0 30,6 5,20	21,7 23,8 26,0 23,0 29,6 5,33	22,7 24,6 28,0 24,0 28,4 5,78	21,1 25,1 26,4 22,7 25,2 5,70	22,9 25,8 28,4 24,3 27,0 6,20	24,3 25,4 26,4 25,3 27,8 6,57	25,4 26,4 28,4 26,1 28,2 6,70	25,1 27,0 29,2 26,2 26,7 7,15	25,1 27,0 29,2 26,2 26,7 7,35	148 148 148 148 148 148, 171, 172
Песок сухой Полиэтилен	28—55				6,07	6,15	6,67	6,44	6,95	7,22	7,45	8,20	7,86	148, 171, 172
	55—83				6,85	6,85	7,63	6,89	7,81	7,90	8,08	8,75	8,36	148, 171, 172
0—83				6,07	6,16	6,70	6,34	7,00	7,22	7,45	7,86	8,36	8,75	148

Среда	d_s , г/см ²	Длина релаксации для плотности потока нейтронов с энергией E , МэВ, или для дозы быстрых нейтронов											Литера- тура	
		$\frac{1}{v}$	$\frac{1}{v} + \frac{1}{v} + \text{Cd}$	$\frac{D_{60}}{E} > 0,33$ МэВ)	$0,7 - 1,5$	$1,5 - 2,5$	$2 - 10$	$2,5 - 4$	$4 - 10$	$10 - 5$	$5 - 7$	$7 - 10$		> 7
Полиэтилен с бором	0—30				5,76	5,86	6,24	6,05	6,44	6,72	7,20	7,50	7,50	148
	30—60 60—86 0—86				7,40 8,65 7,10	7,40 9,12 7,25	7,87 9,61 7,78	7,50 9,32 7,40	8,26 9,80 8,02	8,45 9,80 7,96	8,74 10,10 8,64	9,12 10,80 9,12	9,12 10,80 9,12	148 148 148
Полиэтилен с бором и железом	0—70				15,0	15,5	16,0	15,7	16,1	16,8	17,1	18,1	18,1	148
	70—140 140—200 0—200				15,7 17,7 16,2	16,0 18,3 16,7	17,1 19,7 17,6	16,9 19,0 17,1	17,6 19,6 17,8	20,2 18,3	20,2 18,8	21,2 19,7	21,2 19,7	148 148
Полиэтилен по объему	0—75				14,5	14,5	16,5	16,0	17,5	18,9	20,0	20,3	20,3	148
	75—150 150—250 150—250				19,0 23,0 19,0	19,5 23,5 19,2	19,6 23,9 20,0	19,2 23,1 19,5	20,1 23,9 20,5	20,9 24,1 21,5	22,0 24,7 22,3	22,7 25,7 23,0	22,7 25,7 23,0	148 148 148
Полиэтилен с бором и свинцом (в смеси 15 % свинца по объему)	0—120				31,0	31,4	33,2	31,8	34,2	35,4	36,8	38,8	38,8	148
	120—240 240—360 0—360				31,0 31,0 31,0	31,4 31,4 31,4	33,2 33,2 33,2	31,8 31,8 31,8	34,2 34,2 34,2	35,4 35,4 35,4	36,8 36,8 36,8	38,8 38,8 38,8	38,8 38,8 38,8	148 148 148
Полиэтилен с железом (в смеси 20 % железа по объему)	0—70				15,4	16,3	17,0	16,7	17,5	17,5	18,6	19,4	19,4	148
	70—140 140—200 0—200				16,4 19,1 17,0	17,2 19,3 17,6	17,7 20,0 18,2	17,2 19,3 17,7	18,2 20,5 18,7	18,8 21,0 19,1	19,1 21,4 19,9	18,6 20,9 21,0	19,4 20,9 22,7	148 148 148
Полиэтилен с железом (в смеси 50 % железа по объему)	0—130				29,2	29,7	29,7	30,1	30,6	30,1	31,8	34,2	34,2	148
	130—260 260—390				31,0 34,2	32,5 35,3	31,4 35,8	31,7 34,9	32,0 35,8	33,2 36,2	34,0 37,0	36,0 39,0	36,0 39,0	148 148

Среда	$d, \text{г/см}^2$	Длина релаксации для плотности потока нейтронов с энергией E , МэВ, или для дозы быстрых нейтронов										Литера-тура		
		$\frac{1}{v}$	$\frac{1}{v} + \frac{1}{v} + \text{Cd}$	$\frac{D_{0,n}}{E} > 0,33$ (МэВ)	0,7—1,5	1,5—2,5	2—10	> 2	2,5—3—10	> 3	4—10 ⁵ —10		> 5	7—10
железа по объему)	0—390			31,6	32,5	32,2		32,2	33,2	33,2	34,2	36,4		148
Полиэтилен с железом (в смеси 80 % железа по объему)	0—190 190—380 380—575 0—575			43,1 44,3 51,2 46,4	43,1 47,2 54,6 48,2	42,5 44,4 48,8 45,0		40,5 43,5 49,5 44,4	41,2 44,0 48,5 44,4	41,2 44,4 50,8 45,7	41,5 44,4 50,8 45,7	41,8 47,6 53,4 47,6		148 148 148 148
Свинец	0—840			170**	144**	117		119	107	107	109	109		148
Талькомагнезит	11—565 0—364			267 27,7	181 30,5	29,1		115 27,4	106 28,8	106 28,8	30,0	28,8	98,2	148 148
Титан	0—230			46,8	43,2	42,7		41,9	42,7	42,7	44,0	45,5		148

*1 Состав приведен в табл. 6.11.

*2 Состав приведен в табл. 6.12.

*3 Составы приведены в табл. 6.13.

*4 Для нейтронов с энергией $E > 1,5$ МэВ.

*5 Составы приведены в табл. 6.15.

*6 Измерения дозы для нейтронов с энергией $E > 0,5$ МэВ.*7 Массовый химический состав, %: Fe—60; O₂—30; Si, Mg, Ca, Al—примерно 8—10; Mn, Pb, Cu, Ti, C—около 1.

*8 В эксперименте значения могут быть занижены в связи с утечкой нейтронов этой группы из барьера конечных размеров [151].

Таблица 6.9

Длина релаксации L нейтронов точечных изотропных моноэнергетических источников и (α, n)-источников для различных материалов, г/см²

Среда	Энергия нейтронов, МэВ	$d, \text{г/см}^2$	Длина релаксации для плотности потока нейтронов с энергией E , МэВ, и для дозы нейтронов					Литера-тура	
			Тепловые и медленные нейтроны	$D_{0,n}$ ($E > 0,33$ МэВ)	> 2	> 3	D		
Алюминий	4,0	135					36,1	161	
Бериллий	14,9	135					42,6	161	
	3	35					13,8	183	
Вода	15	70—85					18,9	183	
	2	60						149	
	4	90					4,5	149	
	6	120					6,2	149	
	8	120					9,3	149	
	10	120					11,2	149	
	14	120	14,2				12,6	149	
	14—15	125					14,2	149	
	Po— α —B	120					14,5	184—188	
	Ra— α —Be	120						6,3	189, 190
	Po— α —Be	120						9,8	189, 190
	Pu— α —Be	120						10,3	189, 190
	0,5; 1; 2; 3; 5	35 см						10,5	189, 190
Вода (см. колонку 4 табл. 6.12)	2,0						0,61*1	См. рис. 6.12	15, 138, 192
Водород	4,0						0,92*1		161
	6,0						1,85*1		161
	8,0						1,83*1		161
	10,0						2,02*1		161
	14,0						2,7*1		161
Бетон (см. табл. 6.17)	Po— α —Be						См. табл. 6.18		191
Бетон обычный (см. колонку 3 табл. 6.12)	0,5; 1; 2; 3; 5							См. рис. 6.12	15, 138, 192

Продолжение табл. 6.9

Среда	Энергия нейтронов, МэВ	d, г/см ²	Длина релаксации для плотности потока нейтронов с энергией E, МэВ, и для дозы нейтронов				Литература
			Тепловые и медленные нейтроны	D _{0.33} (E > 0.33 МэВ)	> 2	> 3	
Бетон обычный (см. колонку 1 табл. 6.12)	0,7; 1,3; 2; 3; 4; 6; 8; 10; 12; 14 10-2-14	120 см				15, 138, 193	
							См. рис. 6.13**
Бетон обычный (см. колонку 2 табл. 6.12)		200 см				138	
							См. рис. 6.14
Графит	4,0 14,1 14,9	118 80-110 185			19	161, 194	
							См. рис. 6.12
Грунт сухой (см. колонку 6 табл. 6.12)	0,5; 1; 2; 3; 5				32,9	15, 138, 192	
							См. рис. 6.12
Влажный грунт (100%-ное насыщение водой) (см. колонку 7 табл. 6.12)	0,5; 1; 2; 3; 5					15, 138, 192	
							См. рис. 6.12
Железо	4,0 14,9	350 430			59,5 64,2	161, 196 161, 196	
							См. рис. 6.15
Железородная смесь	4,0 14,9					197 197	
							См. рис. 6.15
Карбид бора	Po-α-Be 3,0 4,0	50-60 8-10 д.с.п 8-10 д.с.п	18,9		15,3 20	197 198	
							См. рис. 6.15
Плексиглас (C ₅ H ₈ O ₂)	14,9 15,0	70 85	29		28,8	199 199	
							См. рис. 6.15
Полиэтилен	4,0 14,9	60 69			7,32 17,7	198 194	
							См. рис. 6.15
Полиэтилен борированный (см. колонку 5 табл. 6.12)	0,5; 1; 2; 3; 5	565 620			169 173	194 196	
							См. рис. 6.12
Свинец	4,0					15, 138, 192	

*1 Расчет для нейтронов с E ≥ 1 МэВ в бесконечной геометрии.

*2 Расчет для тканевой кермы.

Таблица 6.10

Длина релаксации L нейтронов для источников промежуточных энергий, см

Среда	E ₀ , кэВ	Характеристика источника	d, см	Длина релаксации L для различных детекторов				Литература
				Счетчик BF ₃ в Cd	Активационные детекторы	Всеволотовой детектор	РУС-5*1	
Алюминий (ρ = 2,7 г/см ³)	25 ± 4	124Sb-γ-Be*2 24Na-γ-D ₂ O*2	30		45 ± 2 40 ± 2	202	202	
	220 ± 20							
Бетон серпентинитовый (ρ = 2,2 г/см ³)	25 ± 4	124Sb-γ-Be*2 24Na-γ-D ₂ O*2	30		5,3 ± 0,1 5,4 ± 0,1	202	202	
	220 ± 20							
Вода (ρ = 1 г/см ³)	830 ± 50	24Na-γ-Be*2 Точечный изотропный	30		1,56*3	202	202	
	200							
Графит (ρ = 1,67 г/см ³)	500	КПН*7	50*4	2,35	2,35*3 2,92*3	203, 204 203, 204	203, 204	
	1000							
Графит борсодержащий (содержание по массе ~ 8%, ρ = 1,8 г/см ³)	25 ± 4	124Sb-γ-Be*2 24Na-γ-D ₂ O*2	40	2,92	2,1*8 1,9*9	207, 208	208	
	220 ± 20							
Железо (ρ = 7,8 г/см ³)	25 ± 4	124Sb-γ-Be*2 24Na-γ-D ₂ O*2	140		8,7*10 9,8*11	202	202	
	220 ± 20							
Железо борсодержащий (содержание по массе ~ 8%, ρ = 1,8 г/см ³)	25 ± 4	124Sb-γ-Be*2 24Na-γ-D ₂ O*2	140		5 ± 0,5 10 ± 0,5	202	202	
	220 ± 20							
Карбид бора (ρ = 1,3 г/см ³)	830 ± 50	24Na-γ-Be*2 КПН*7	84	24,8*15 37*16 6,0*8 6,0*9	27 ± 1 28 ± 2	210	211	
	200							
Полиэтилен (ρ = 1,3 г/см ³)	25 ± 4	124Sb-γ-Be*2 24Na-γ-D ₂ O*2	84		19 ± 0,3 19 ± 0,4	202	202	
	220 ± 20							
Полиэтилен (ρ = 1,3 г/см ³)	25 ± 4	124Sb-γ-Be*2 24Na-γ-D ₂ O*2	80		2,7 ± 0,2	208	208	
	220 ± 20							

Продолжение табл. 6.10

Среда	E ₀ , кэВ	Характеристика источника	d, см	Длина релаксации L для различных детекторов				Литература
				Счетчик BF ₃ в Cd	Активные детекторы	Всеволоновой детектор	РУС—5*1	
= 0,92 г/см ³)	~25	¹²⁴ Sb—γ—Be*14	11		2,0 ± 0,1			211
	220 ± 20	²⁴ Na—γ—D ₂ O*2	16		2,9 ± 0,2			202
Полиэтилен борсодержащий (содержание по массе ~5%, ρ = 0,96 г/см ³)	~220	²⁴ Na—γ—D ₂ O*14	11				2,3 ± 0,05	211
	~830	²⁴ Na—γ—Be*14	11				3,4 ± 0,1	211
	25 ± 4	¹²⁴ Sb—γ—Be*2	12		1,7 ± 0,1			202
	220 ± 20	²⁴ Na—γ—D ₂ O*2	12		2,5 ± 0,2			202
	830 ± 50	²⁴ Na—γ—Be*2	12				3,5 ± 0,2	202
	220 ± 20	²⁴ Na—γ—D ₂ O*2						202
Титан (ρ = 4,5 г/см ³)	830 ± 50	²⁴ Na—γ—Be*2			38 ± 2		33 ± 5	202

*1 Характеристики детекторов РУС—5 и РУС—7 приведены в работах [200, 201] соответственно.
 *2 Источник установлен вплотную к защите, расстояние источник — детектор постоянно и равно 50 см. Для (¹²⁴Sb—γ—Be)-источников результаты можно интерпретировать как данные об ослаблении дозы нейтронов.
 *3 Расчет для распределения нейтронов с энергией E = 1 эВ.
 *4 Эксперимент проведен до d = 30 см.
 *5 Эксперимент проведен до d = 35 см.
 *6 На выходе установки КПН приходится ~10⁵ нейтронов с энергией E < 1,4 МэВ, средняя энергия спектра ~80 кэВ, 55 % нейтронов сосредоточено при E = 21,5 ÷ 46,5 кэВ; угловое распределение потока излучения на выходе КПН имеет вид f(θ₀) = (0,5 + cosθ₀)/π (θ₀ — угол, отсчитываемый от нормали к поверхности источника).

*7 КПН — конвертор промежуточных нейтронов со следующими характеристиками: на один нейтрон с E > 1,4 МэВ приходится ~10⁵ нейтронов с энергией E < 1,4 МэВ, средняя энергия спектра ~80 кэВ, 55 % нейтронов сосредоточено при E = 21,5 ÷ 46,5 кэВ; угловое распределение потока излучения на выходе КПН имеет вид f(θ₀) = (0,5 + cosθ₀)/π (θ₀ — угол, отсчитываемый от нормали к поверхности источника).
 *8 Эксперименты с детекторами ⁶³Cu(n, γ)⁶⁴Cu и ¹¹⁵In(n, γ)¹¹⁶In в кадмии.
 *9 Расчет в 2D₅-приближении метода дискретных ординат для детекторов по реакции ⁶³Cu(n, γ)⁶⁴Cu и ¹¹⁵In(n, γ)¹¹⁶In в кадмии.
 *10 Эксперименты с детекторами ⁶³Cu(n, γ)⁶⁴Cu, ¹¹⁵In(n, γ)¹¹⁶In, ²³Na(n, γ)²⁴Na, ¹⁸⁶W(n, γ)¹⁸⁷W, с камерой деления с ²³⁹Pu в кадмии для призм поперечным размером 140 × 140 см.
 *11 Расчеты в 2D₅-приближении метода дискретных ординат для указанных в списке 10 детекторов для бесконечной среды. Приведенная к призме размером 140 × 140 × 140 см L = 9,2 см.
 *12 Спектр нейтронов реактора, смягченный 3 м натрия.
 *13 Эксперимент с ⁵⁶Mn(n, γ)⁵⁶Mn, ¹⁹⁷Au(n, γ)¹⁹⁷Au.
 *14 Защитный материал поперечным размером 200 × 100 см устанавливали на расстоянии 2—3 м от источника нейтронов.
 *15 Эксперименты с детектором ⁶³Cu(n, γ)⁶⁴Cu при поперечном размере призм из исследуемого материала 120 × 120 см.
 *16 Расчеты в 2D₅-приближении метода дискретных ординат для указанного в списке 15 детектора для бесконечной среды. Приведенная к призме размером 120 × 120 × 84 см L = 24 см; для d = 500 см в бесконечной геометрии L = 42 см.

Таблица 6.11

Бетон	ρ, г/см ³	Химический состав бетонов												
		Si	Fe	Al	Ca	Mg	S	C	Cr	H	O	Na	F	B
Обычный	2,20	0,316	0,008	0,033	0,576	0,022	0,005	0,14	—	0,01	1,093	—	—	—
Хромитовый (жаропрочный)	3,085	0,145	0,241	0,160	0,109	0,177	0,002	0,018	1,030	0,002	1,124	0,035	0,023	—
То же + 32 кг/м ³ бора	3,076	0,143	0,238	0,159	0,106	0,175	0,002	0,027	1,019	0,002	1,105	0,032	0,020	0,032
То же + 65 кг/м ³ бора	3,076	0,142	0,235	0,156	0,105	0,173	0,002	0,018	1,004	0,002	1,107	0,033	0,020	0,065
Магнетитовый	2,55	0,0993	0,023	0,0115	0,0876	1,211	0,0097	—	—	0,002	1,039	0,0481	0,008	—

Таблица 6.12

Составы материалов, использованных для расчетов прохождения нейтронов

Элемент	Ядерная плотность, 10 ²¹ атом/см ³						
	1	2	3	4	5	6	7
Колодка							
H	9,3	8,5	13,75	66,90	76,80	8,553	16,87
O	46,3	35,5	45,87	33,45	39,20	22,68	27,00
C	6,5	20,2			0,658		
¹⁰ B					2,67		
¹¹ B							
Mg		1,86					
Al		0,556					
Si	9,92	1,70	1,743				1,976
Ca	8,83	11,1	20,15			2,014	8,963
Fe		0,193					
Na+K		0,057					
Влажный грунт (со 100%-ным обогащением водной долей)							
Сухой грунт [15, 138, 192], ρ = 1,15 г/см ³							
Влажный грунт [15, 138, 192], ρ = 1,25 г/см ³							

Таблица 6.13

Массовый химический состав различных бетонов, %

Плотность, г/см ³	Содержание водорода при 85 °С						Содержание других элементов при среднем количестве водорода						
	Номер бетона						O	Al	Si	S	Ca	Fe	Ba
	1	2	3	4	5	6							
2,3	0,10	0,35	0,61	0,81	0,84	0,94	52,90	4,41	30,95	0,15	7,66	2,03	—
2,6	0,78	0,88	1,28	1,96	2,04	2,10	40,53	0,74	3,96	—	5,20	46,39	—
3,2	0,30	0,46	0,54	0,62	0,70	0,85	32,82	0,89	11,10	—	4,94	48,81	—
3,5	0,19	0,35	0,43	0,50	0,58	0,64	31,00	2,80	—	11,50	3,50	7,53	42,50
3,6	0,25	0,33	0,43	0,49	0,61	0,89	32,05	3,26	12,38	0,38	3,69	50,13	—
4,2	0,23	0,26	0,32	0,42	0,46	0,74	15,47	1,13	4,89	—	1,24	66,27	—
4,6	0,18	0,28	0,33	0,50	0,60	0,65	9,36	1,54	0,69	—	1,67	75,25	—
5,2	0,15	0,35	0,43	0,52	—	—	5,05	2,52	0,20	0,13	3,13	78,94	—

Таблица 6.14

Длины релаксации быстрых нейтронов ($E > 1,5$ МэВ) (источник — нейтроны деления), см

Плотность бетона, г/см ³	Номер бетона, химический состав см. в табл. 6.13						Плотность бетона, г/см ³	Номер бетона, химический состав см. в табл. 6.13					
	Номер бетона							1	2	3	4	5	6
	1	2	3	4	5	6							
2,3	13,1	12,6	12,2	11,8	11,5	11,4	3,6	9,8	9,5	9,4	9,3	8,9	8,7
2,6	12,4	14,4	11,8	9,8	9,6	9,4	4,2	9,4	9,3	9,2	8,9	8,8	8,4
3,2	10,7	10,2	10,1	10,0	9,9	9,7	4,6	9,0	8,8	8,6	8,3	8,2	8,1
3,5	11,4	10,8	10,7	10,4	10,3	10,2	5,2	8,3	7,9	7,7	7,5	—	—

Таблица 6.15

Состав бетонов

Номер бетона	Бетон	Вид цемента	Объемная масса, т/м ³	Вид заполнителя		Расход материалов на 1 м ³ бетона, кг			
				Мелкий	Крупный	Цемент	Песок	Щебень	Вода
1	Обычный	П	2,32	Кварцевый	Известняк	279	720	1145	176
2	Обычный	П	2,43	Лимонит	Гранит	284	660	1330	170
3	Гидратный	П	2,60	Барит	Лимонит	316	935	1115	232
4	Тяжелый	П	3,30	Гематит	—	465	2660	—	178
5	Тяжелый	П	3,00	Гематит	Гематит	350	920	1520	240
6	Серпентинитовый	П	2,30	Серпентинит	Серпентинит	363	641	1051	245
7	Гидратный	ГГ	2,36	Кварцевый	Известняк	304	620	1260	176
8	Гидратный	М	2,41	Лимонит	И	295	600	1264	250
9	Гидратный	ГГ	2,90	Барит	Гематит	330	750	1580	240
10	Гидратный	ГГ	3,20	Барит	—	480	2550	—	170
11	Тяжелый	П	5,00	Кварцевый	Металлический	320	540	3990	150
12	Тяжелый	П	6,00	Дробь (сталь)	И	450	2250	3150	156
13	Обычный с бором*1	П	2,36	Кварцевый	Гранит	270	620	1285	164
13а	Обычный с бором*2	П	2,20	И	И	270	620	1285	—
14	Серпентинитовый с бором*3	П	2,36	Серпентинит	Серпентинит	380	585	1070	250
15	Железосерпентинитовый с бором*4	П	3,55	Металлический	И	410	1800	1050	235

Примечание. П — порландский марки 400; ГГ — гипсолгноземистый; М — магnezиальный. Дана объемная масса свежеуложенного бетона.

*1 Обезвоженный путем прокаливании при 130 °С до постоянной массы. В состав бетона введено 20 кг/м³ бора (В₄С).

*2 В состав бетона введено 20 кг/м³ бора (В₄С).

*3 В состав бетона введено 72 кг/м³ бора (В₄С).

*4 В состав бетона введено 55 кг/м³ бора (В₄С).

Длина релаксации плотности потока нейтронов в бетонах, см

Номер бетона (по табл. 6.15)	Толщина слоя, см	Энергия нейтронов, МэВ							
		0,2—0,4	0,4—0,8	0,8—1,4	1,4—2,5	2,5—4	4—6,5	6,5—10	
1	0—50	10,6	9,7	10,0	—	—	—	—	—
	50—100	11,3	11,9	12,0	—	—	—	—	—
	100—150	11,3	11,9	13,2	—	—	—	—	—
2	0—150	11,0	10,7	11,2	12,1	12,0	12,1	13,4	
	0—100	10,5	11,0	10,7	11,0	11,6	11,6	11,7	
3	0—50	7,6	7,5	—	—	—	—	—	
	50—100	9,2	9,4	—	—	—	—	—	
4	0—100	8,3	8,3	8,3	9,0	9,1	10,0	11,1	
	0—50	9,9	—	—	—	—	—	—	
5	50—150	11,9	—	—	—	—	—	—	
	0—150	10,8	10,1	10,3	11,0	10,3	11,4	11,6	
6	0—150	9,4	9,4	9,4	9,8	9,8	10,0	10,5	
	0—50	8,3	8,3	8,0	8,8	9,8	10,0	—	
7	50—100	11,0	10,8	10,6	10,7	—	—	—	
	100—150	11,0	10,8	10,6	10,7	—	—	—	
	0—150	9,5	9,4	9,4	9,7	9,6	10,4	11,3	
8	0—50	—	8,9	10,0	—	10,5	—	—	
	50—100	—	13,0	12,7	—	11,6	—	—	
	100—150	—	13,4	12,9	—	11,7	—	—	
9	0—150	11,8	11,4	11,7	12,2	11,3	12,6	12,7	
	0—50	11,2	11,0	11,0	11,0	10,9	11,8	12,3	
10	50—100	10,0	10,2	—	10,0	9,3	—	—	
	100—150	10,2	10,3	—	11,0	11,3	—	—	
	0—150	10,1	10,2	10,4	10,7	10,5	10,6	10,8	
11	0—150	9,9	10,4	10,8	10,9	8,4	11,4	12,0	
	0—50	8,5	8,8	8,8	8,8	8,4	8,3	8,8	
12	0—150	8,0	8,6	8,5	8,3	7,8	7,9	8,0	
	0—50	—	9,1	9,1	10,1	—	—	—	

Номер бетона (по табл. 6.15)	Толщина слоя, см	Энергия нейтронов, МэВ							
		0,2—0,4	0,4—0,8	0,8—1,4	1,4—2,5	2,5—4	4—6,5	6,5—10	
13а	50—100	—	11,3	11,3	11,5	—	—	—	—
	100—150	—	—	12,2	12,3	—	—	—	—
	0—150	9,1	9,6	10,8	11,4	10,7	11,5	11,9	
14	0—150	13,5	14,5	11,6	11,7	11,7	12,1	13,0	
	0—50	8,4	—	8,1	8,6	—	—	—	
15	50—100	9,6	—	9,3	9,8	—	—	—	
	100—150	9,8	—	9,5	10,5	—	—	—	
	0—150	9,3	8,7	9,0	9,4	9,5	10,2	10,8	
15	0—50	7,7	7,7	8,1	8,1	—	—	—	
	50—120	9,6	9,6	8,9	8,7	—	—	—	
15	0—120	8,5	8,5	8,5	8,4	8,3	8,7	9,0	

Таблица 6.17

Составы специальных бетонов

Порядковый номер бетона	Вид цемента		Вид заполнителя		Вид добавки	Расход материалов, кг/м ³					Добавка, % от массы бетона		Водоцементное отношение и добавка, отн. ед.	Объемная масса т/м ³
	Мелкий	Крупный	Щебень	Песок		Цемент	Вода	Добавка	В	CaCl ₂				
1	Портландский	Сerpентин	Магнетит	Сerpентин	Борат кальция	210	991	811	262	105	0,5	—	0,8	2,4
2	То же	Обрезки арматуры	—	То же	То же	294	—	3550	260	191	0,5	—	0,9	4,55
3	»	То же	Магнетит	Сerpентин	»	264	—	3510	285	248	0,75	—	1,08	4,55
4	Магнезиальный	Сerpентин	Магнетит	Сerpентин	»	213	1058	865	288	107	0,5	—	0,9	2,53
5	Портландский	»	»	»	»	216	1071	890	256	108	0,5	—	0,8	2,53
6	»	Датолит	Датолит	Датолит	Датолит	207	421	1584	177	207	3,4	—	0,43	2,6
7	Магнезиальный	Обрезки арматуры	—	Обрезки арматуры	Борат кальция	323	—	3880	254	208	0,5	—	0,8	4,65
8	Портландский	Шамот	Шамот	Шамот	Шамот	374	374	579	300	374	—	—	0,4	2,0
9	Боросодержащий	Боросодержащий	Боросодержащий	Боросодержащий	Боросодержащий	382	382	591	260	382	3,44	—	0,34	2,0
10	Портландский № 28	Датолит	Датолит	Датолит	Датолит	507	507	784	248	507	2,84	—	0,24	2,55
11	Боросодержащий	Шамот	Боросодержащий	Шамот	Боросодержащий	390	390	603	278	390	2,0	—	0,35	2,05
12	портландский № 28	Арматурные обрезки	—	Арматурные обрезки	Борат кальция	325	—	3325	358	325	0,9	—	1,1	4,40

Таблица 6.18

Сечения ослабления Σ потоков нейтронов всего спектра (Po- α -Be)-источника и сечения ослабления тепловых нейтронов $\Sigma_{т.н}$ для различных бетонов (измерения в барьерной геометрии)

Порядковый номер бетона (по табл. 6.17)	Измерения «всевоновым» счетчиком		Тепловые нейтроны		
	Σ , см ⁻¹	Толщина ослабляющего слоя, см	$\Sigma_{т.н}$, см ⁻¹	Толщина ослабляющего слоя, см	Содержание бора, % от массы бетона
1	0,0626	> 15			
2	0,0754	> 15			
3	0,0827	> 15	0,277	< 5	0,75
4	0,0846	> 15	0,0380	> 10	0,0380
5	0,06442	> 15	0,180	< 5	0,5
6	0,0768	> 15	0,0425	> 10	
7	0,0961	> 15	0,183	< 5	0,5
8	0,0680	> 15	0,0346	> 10	
9	0,0606	> 15	0,354	< 5	3,4
10	0,0725	> 15	0,0258	> 10	
11	0,0626	> 15	0,0525	> 20	
12	0,0758	> 10	0,354	< 5	3,44
			0,0277	> 10	2,84
			0,198	< 5	2,0
			0,034	> 10	

Таблица 6.19

Характеристики детекторов быстрых нейтронов

Детектор	Энергетический порог, МэВ	Эффективный энергетический порог по спектру нейтронов деления, МэВ
Счетчик протонов отдачи		~ 0,5* ¹
Камера деления ²³⁷ Np(n, f)		~ 1
²³² Th(n, f)		~ 2
²³⁸ U(n, f)		~ 2
Пороговый детектор ³¹ P(n, p) ³¹ Si	1,1	~ 3
³² S(n, p) ³² P	1,0	~ 3
²⁷ Al(n, p) ²⁷ Mg	2,1	~ 5
²⁴ Mg(n, p) ²⁴ Na	2,1	~ 5
²⁸ Si(n, p) ²⁸ Al	2,7	~ 5
²⁷ Al(n, α) ²⁴ Na	6,0	~ 7
⁵⁶ Fe(n, p) ⁵⁶ Mn	2,1	
⁶³ Cu(n, 2n) ⁶² Cu	10,9	

*¹ Характеристика близка к дозовой.

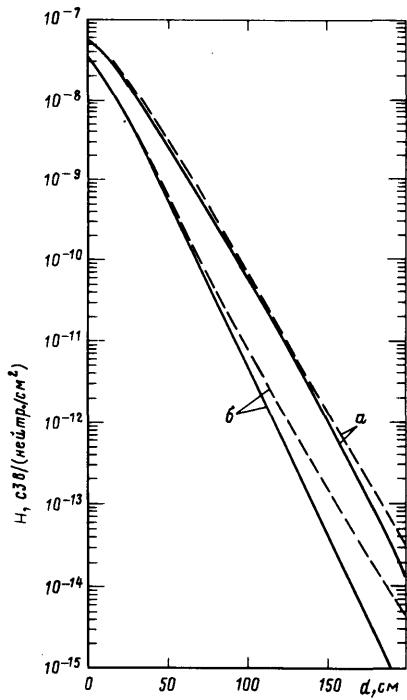


Рис. 6.9*. Полная эквивалентная доза от нейтронов и вторичного γ -излучения (—) и доза от нейтронов (---) в зависимости от толщины обычного бетона ($\rho = 2,3 \text{ г/см}^3$) марки TSF (состав приведен в табл. 6.12): для нейтронов с $\Delta E_0 = 12,2 \div 15 \text{ МэВ}$ (а) и источника нейтронов деления (б) для плоского мононаправленного источника при почти нормальном падении на барьер ($\cos\theta_0 = 0,9894$)

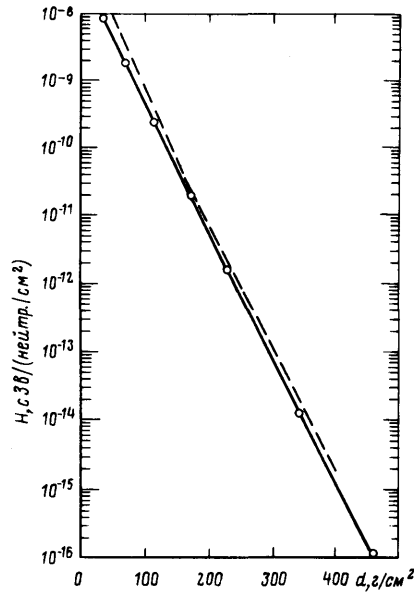


Рис. 6.10. Эквивалентная доза нейтронов в зависимости от толщины обычного бетона марки TSF (состав приведен в табл. 6.12) для плоского изотропного источника нейтронов деления (данные нормированы на 1 нейтр./см² источника в направлении 2л ср в сторону защиты): — метод дискретных ординат [138], --- метод моментов [166]

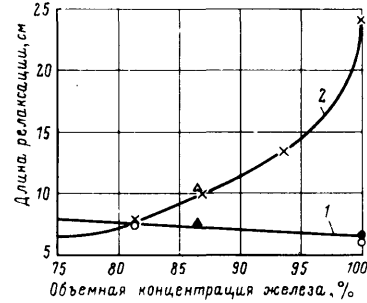


Рис. 6.11. Длины релаксации быстрых (1), тепловых и промежуточных (2) нейтронов в железобетонных смесях для нейтронов реактора [178]. Измерения индикаторами по реакции $^{63}\text{Cu}(n, \gamma) ^{64}\text{Cu}$ [178] (X), по реакции $^{32}\text{S}(n, p) ^{32}\text{P}$ [178] (●), по реакции $^{27}\text{Al}(n, \alpha) ^{24}\text{Na}$ [125] (○), по реакции $^{32}\text{S}(n, p) ^{32}\text{P}$ [179] (▲), золотыми фольгами [179] (Δ)

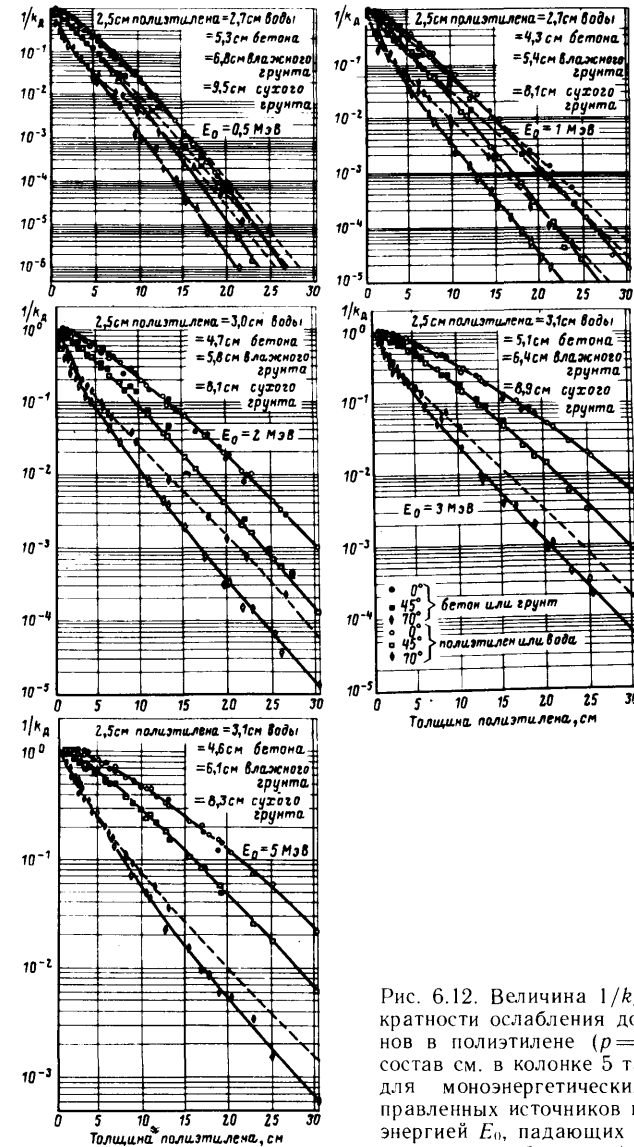


Рис. 6.12. Величина $1/k_d$, обратная кратности ослабления дозы нейтронов в полиэтилене ($\rho = 0,97 \text{ г/см}^3$, состав см. в колонке 5 табл. 6.12*), для моноэнергетических мононаправленных источников нейтронов с энергией E_0 , падающих под разными углами на барьеры (расчет методом Монте-Карло) [15, 138, 192].

Обозначения см. на рис. для $E_0 = 3 \text{ МэВ}$. Приводимые в верхних частях рисунков эквивалентные толщины воды, обычного бетона, сухого грунта и влажного грунта (со 100 %-ным насыщением водой), плотности и составы которых приведены в табл. 6.12, позволяют произвести расчет $1/k_d$ для этих сред

* Проведенные расчеты для слоев из чистого неборированного полиэтилена ($\rho = 0,925 \text{ г/см}^3$) толщиной до 15 см привели приблизительно к тем же кривым распространения нейтронов, что и в борированном полиэтилене.

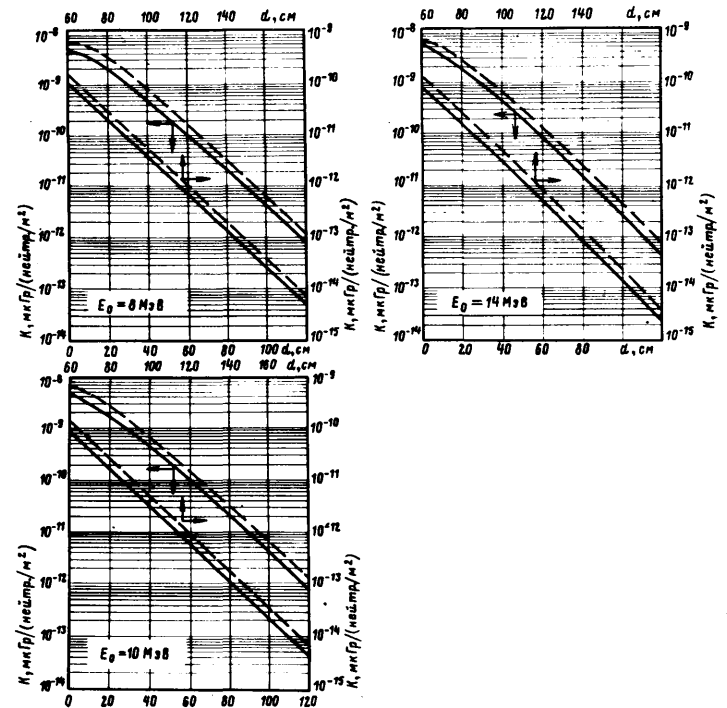
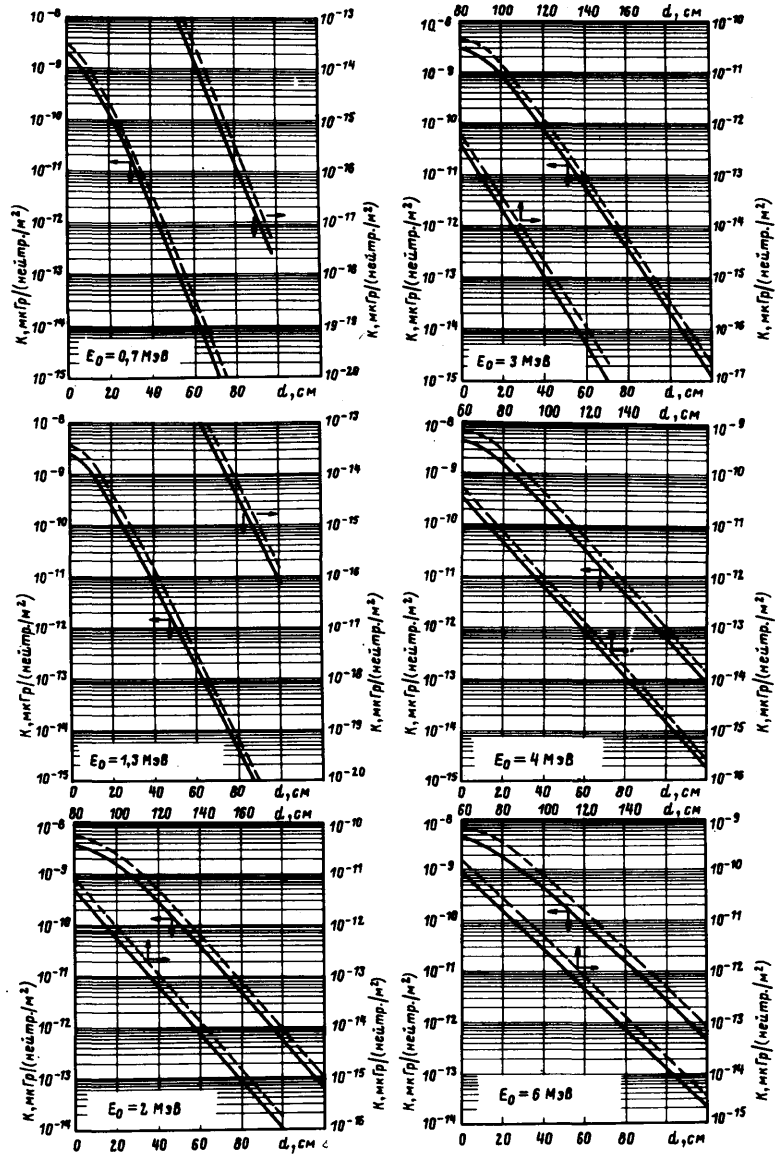


Рис. 6.13. Тканевая керма нейтронов K в обычном бетоне ($\rho=2,43 \text{ г/см}^3$, состав указан в колонке 1 табл. 6.12) для моноэнергетических мононаправленных источников нейтронов с энергией E_0 при нормальном падении на барьеры (—) и полубесконечную среду (---). Расчет методом Монте-Карло [15, 138, 193]

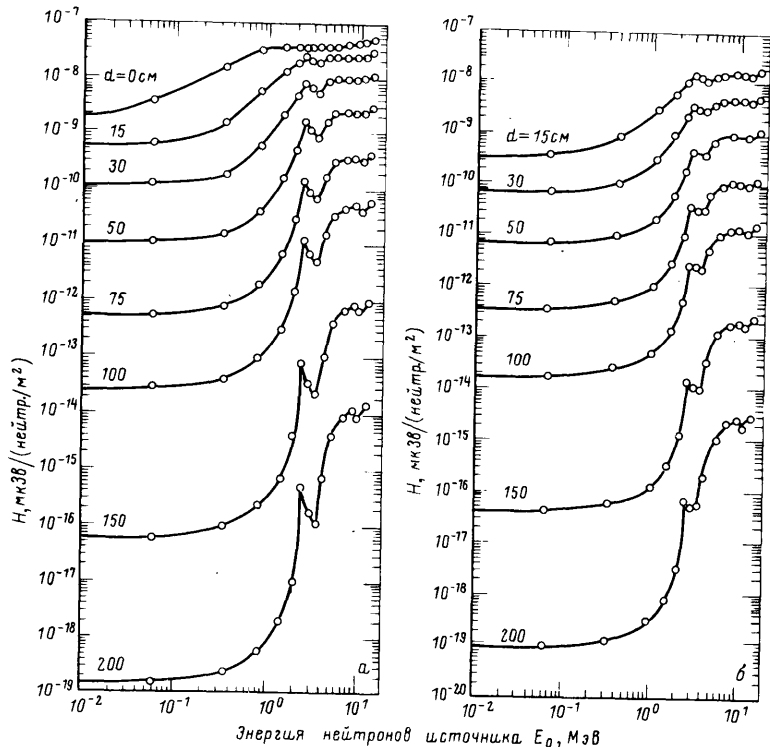


Рис. 6.14. Эквивалентная доза нейтронов // в барьерах из обычного бетона ($\rho = 2,3 \text{ г/см}^3$, состав см. в столбце 2 табл. 6.12) в зависимости от энергии нейтронов плоского мононаправленного при почти нормальном падении ($\cos\theta_0 = 0,9894$) (а) и плоского изотропного (б) источников

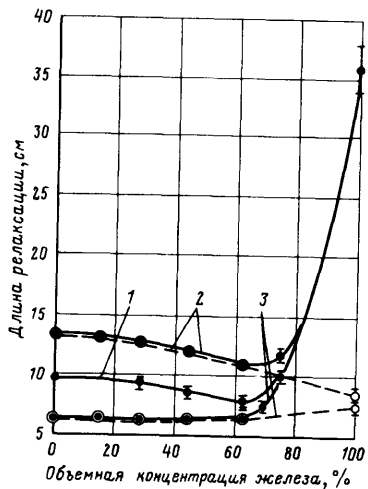


Рис. 6.15. Длина релаксации тепловых (●) и быстрых ($E \geq 2 \text{ МэВ}$) (○) нейтронов в железоводных смесях (толщина вещества — 10–15 длин свободного пробега) для точечных изотропных (Po— α —Be)-источника (1), источника с $E_0 = 14,9 \text{ МэВ}$ (2), источника с $E_0 = 4 \text{ МэВ}$ (3). Измерения в условиях полубесконечной геометрии [161, 197]

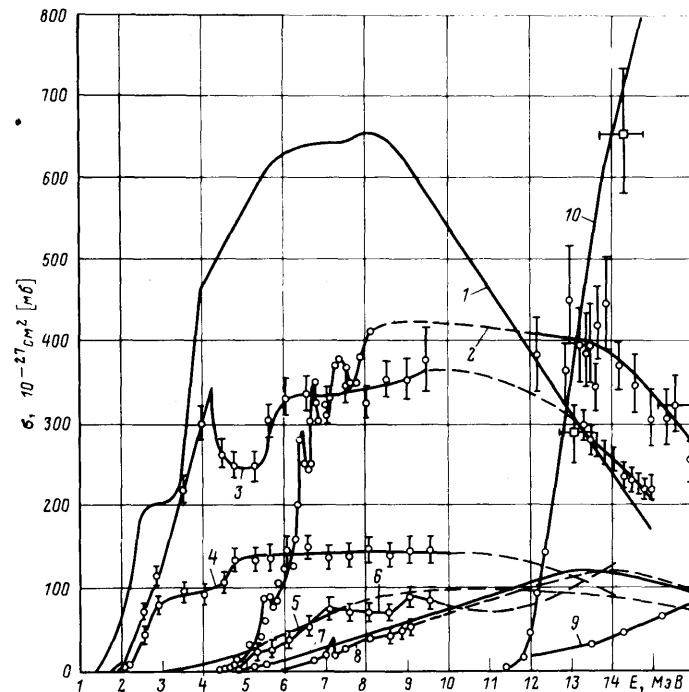


Рис. 6.16. Зависимость сечений пороговых индикаторов от энергии нейтронов для реакций: 1 — $^{58}\text{Ni}(n, p)^{58}\text{Co}$; 2 — $^{28}\text{Si}(n, p)^{28}\text{Al}$; 3 — $^{32}\text{S}(n, p)^{32}\text{P}$; 4 — $^{31}\text{P}(n, p)^{31}\text{Si}$; 5 — $^{27}\text{Al}(n, p)^{27}\text{Mg}$; 6 — $^{34}\text{S}(n, \alpha)^{31}\text{Si}$; 7 — $^{56}\text{Fe}(n, p)^{56}\text{Mn}$; 8 — $^{27}\text{Al}(n, \alpha)^{24}\text{Na}$; 9 — $^{58}\text{Ni}(n, 2n)^{57}\text{Ni}$; 10 — $^{63}\text{Cu}(n, 2n)^{62}\text{Cu}$

В случае, когда на одной строке приведены длины релаксации, измеренные для близких, но различающихся значений d , в табл. 6.8 указаны усредненные значения.

Следует иметь в виду, что в общем случае ход кривой ослабления на начальном участке на расстоянии от источника в 2–3 длины релаксации может отличаться от экспоненциального. Это отличие может учитываться введением в зависимости вида (6.10) или (6.11) множителем коэффициента f , характеризующего отклонение от экспоненциальной формы кривой ослабления на начальных расстояниях от источника [101].

Значения f для моноэнергетических источников приведены в табл. 6.20. Для источников нейтронов деления часто $f \approx 1$.

С учетом коэффициента f плотность потока нейтронов, например, моноэнергетического точечного изотропного источника мощностью S_0 после защиты толщиной d , когда источник и детектор находятся на противоположных сторонах защиты, можно определить из соотношения

$$\varphi(d) = (S_0 f / (4\pi d^2)) \exp\left(-\sum_{i=1}^m \Delta d_i / L_i\right), \quad (6.12)$$

где $\sum_{i=1}^m \Delta d_i = d$.

Таблица 6.2

Значение коэффициентов f для потоков нейтронов с энергией $E > 1,5$ МэВ [161]

Среда	Энергия источника E_0 , МэВ						
	2	4	6	8	10	14	14,9
Алюминий		3,5					2,5
Вода		5,4	4,6	4,2	3,3	2,9	3,0
Водород	3,5	3,5	3,5	2,8	2,8	2,8	
Графит		1,4					1,3
Железо		4,9					2,7
Карбид бора		5,0					1,8
Плексиглас		2,1					2,1
Полиэтилен		2,4					2,5
Свинец		4,0					2,9

Для немонотонического источника со спектром вида $S(E_0)$

$$\phi(d) = (S_0 / (4\pi d^2)) \sum_j f_j \exp\left(-\sum_i \Delta d_i / L_{ji}\right) S(E_{0j}), \quad (6.13)$$

где $S(E_{0j})$ — доля нейтронов источника в энергетическом интервале от E_{0j} до $E_{0j} + \Delta E_{0j}$, f_j — коэффициент для энергии $E_{0j} + \frac{\Delta E_{0j}}{2}$; L_{ji} — длина релаксации для нейтронов с энергией $E_{0j} + \frac{\Delta E_{0j}}{2}$ на толщине защиты i -го участка.

Заметим, что для защиты, представляющей собой смесь тяжелых ядер и легких, длину релаксации L часто можно рассчитать из соотношения

$$1/L = c_l/L_l + c_t/L_t, \quad (6.14)$$

где L_l и L_t — длина релаксации для легкого и тяжелого компонентов соответственно; c_l и c_t — относительные объемные концентрации легкого и тяжелого компонентов соответственно ($c_l + c_t = 1,0$).

§ 6.5. СЕЧЕНИЯ ВЫВЕДЕНИЯ

В большинстве водородсодержащих сред при выполнении некоторых условий ослабление мощности дозы быстрых нейтронов вводимыми в защиту элементами можно учесть простым экспоненциальным множителем типа $\exp(-\Sigma_{\text{выв}} t)$, где $\Sigma_{\text{выв}}$ — сечение выведения; t — толщина вводимого элемента.

Для оценки сечения выведения можно воспользоваться приближенной формулой

$$\Sigma_{\text{выв}}(E) \simeq \Sigma_n(E) - 2\pi \int_{-1}^{+1} \Sigma_p(E, \mu) \mu d\mu, \quad (6.15)$$

где $\Sigma_0(E)$ — полное сечение; $\Sigma_p(E, \mu)$ — дифференциальное сечение упругого рассеяния нейтронов с энергией E в угле $\arccos \mu$; μ — косинус угла упругого рассеяния.

В общем виде сечение выведения нейтронов зависит от энергии нейтронов и условий эксперимента: способа введения вещества в водородсодержащую среду, геометрии и углового распределения излучения источника и др. [9, 46, 63, 72, 161, 170, 212—214].

В зависимости от способа введения вещества в защиту различают сечения выведения для гетерогенных сред (слой вещества вводится в водородсодержащую среду вблизи источника) и сечения выведения для однородных сред (вещество равномерно распределяется в водородсодержащем материале).

СЕЧЕНИЕ ВЫВЕДЕНИЯ НЕЙТРОНОВ ДЛЯ ГЕТЕРОГЕННЫХ СРЕД

Закон ослабления мощности дозы нейтронов заданного спектра вводимой пластиной из некоторого материала (рис. 6.17) можно записать в виде

$$\dot{D}(d, t) = \dot{D}_H(d-t) \exp(-\Sigma_{\text{выв}} t), \quad (6.16)$$

где $\dot{D}(d, t)$ — мощность дозы быстрых нейтронов на расстоянии d от источника; $\dot{D}_H(d-t)$ — мощность дозы быстрых нейтронов в чистом водородсодержащем материале толщиной $(d-t)$ без пластины; $\Sigma_{\text{выв}}$ — сечение выведения, см^{-1} ; t — толщина пластины, см.

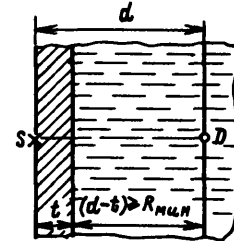


Рис. 6.17. Геометрия эксперимента для определения сечения выведения для гетерогенных сред

Сечение выведения, $\text{см}^2/\text{г}$, для сложных по химическому составу сред (например, бетонов) можно рассчитать по формуле

$$\Sigma_{\text{выв}, m} = \frac{1}{100} \sum_{i=1}^n \Sigma_{\text{выв}, m_i} \eta_i, \quad (6.17)$$

где n — число различных химических элементов в среде; $\Sigma_{\text{выв}, m_i}$ и η_i — сечение выведения, $\text{см}^2/\text{г}$, и массовое содержание, %, i -го элемента соответственно.

Толщина водородсодержащего материала $R_{\text{мин}}$ (рис. 6.17) характери-

Микроскопические сечения выведения, 10^{-24} см² [6]

Элемент	Атомная масса	Энергия нейтронов,		
		Спектр нейтронов деления по данным разных авторов	0,5	1
H	1,008		$1,00 \pm 0,05^{*1}$ [212]	
D	2		$0,88 \pm 0,10^{*1}$ [212]	
Li	6,94		$1,01 \pm 0,04$ [212]	
Be	9,01		$1,07 \pm 0,06$ [212]	
B	10,82		$0,97 \pm 0,10^{*1}$ [212]	
C	12,01		$0,81 \pm 0,05$ [212]	$3,16 \pm 0,25$ [204]
O	16,06	1,07[161]	$0,99 \pm 0,10^{*1}$ [212]	$2,08 \pm 0,23$ [204]
F	19,00		$1,29 \pm 0,06^{*1}$ [212]	$3,2$ [66]
Na	22,99	$1,77 \pm 0,12$ [215]	$1,26$ [161]	$2,5$ [66, 217]
Mg	24,32	1,34 [216]	$1,29$ [161]	
Al	26,98	$1,445 \pm 0,058$ [215]	$1,31 \pm 0,05$ [212]	
Si	28,09	1,4 [216]	$1,37$ [72]	
			$1,20$ [161]	
P	30,97	1,45 [216]	$1,33$ [161]	
S	32,06	1,48 [216]	$1,61$ [161]	
Cl	35,46		$1,2 \pm 0,8^{*1}$ [212]	
Ca	40,08	1,62 [216]	$1,60$ [161]	
Ti	47,90	1,75 [216]	$1,82$ [72]	
			$1,72$ [161]	
V	50,95	1,77 [216]		
Cr	52,01	1,77 [216]		
Mn	54,94	1,84 [216]	$1,79$ [161]	
Fe	55,85	$2,01 \pm 0,04$ [46]	$1,98 \pm 0,08$ [212]	$2,36 \pm 0,47$ [204]
				$1,04 \pm 0,11$ [204]
Ni	58,69		$1,89 \pm 0,10$ [212]	$2,0$ [66]

МэВ					
2,9 [*] ±0,1	3[219]	4,0	6,7[215]	14,9	15,0[219]
					$1,04 \pm 0,05$
	$2,31 \pm 0,18$				$0,82 \pm 0,6$
$1,38 \pm 0,13^{*2}$ [218]					$0,92 \pm 0,02$
$1,58 \pm 0,02$ [218]		$1,06 \pm 0,05^{*5}$ [161]	$0,82 \pm 0,02^{*7}$	$0,50 \pm 0,02^{*2}$ [215]	$0,70 \pm 0,06$
	$0,48 \pm 0,19$				
$1,68 \pm 0,7$ [218]					$1,24 \pm 0,11$
	$1,38 \pm 0,19$				$1,58 \pm 0,09$
	$2,4 \pm 0,4$				$1,54 \pm 0,04$
$1,96 \pm 0,04$ [218]		$2,0 \pm 0,08^{*4}$ [199]	$2,28 \pm 0,01^{*7}$	$1,34 \pm 0,13^{*6}$ [215]	$1,58 \pm 0,05$
		$1,89 \pm 0,19^{*6}$ [161]		$1,62 \pm 0,06^{*4}$ [199]	
$1,90 \pm 0,03$ [217]					$1,59 \pm 0,07$ [217]

Элемент	Атомная масса	Энергия нейтронов,			
		Спектр нейтронов деления по данным разных авторов		0,5	1
Cu	63,54		2,04 ± 0,11 [212]		
Zn	65,38	2,12			
Zr	91,22	2,36 ± 0,12 [212]			
Nb	92,91	2,37 [72]			
Mo	95,95	2,35 [216]	2,38 [72]		
Cd	112,41	3,04 [216]	2,73 [161]		
Ba	137,36	2,82 [216]	3,33 [161]		
W	183,92	3,36 [72]	2,51 ± 0,55 [212]		
Pb	207,21		3,53 ± 0,30 [212]	1,22 ± 0,78 [204]	2,87 ± 0,63 [204]
Bi	209,00		3,49 ± 0,35 [212]		
U	238,07		3,6 ± 0,4 [212]		

- *1 Получено из результатов измерений соединений элементов.
- *2 При измерениях использовали В.С.
- *3 При измерениях использовали порошок с 15%-ным содержанием воды.
- *4 Получено при измерении в гетерогенной смеси данного элемента с В.С.
- *5 Значения получены при измерении ослабления быстрых нейтронов в 8—15 длин свободного пробега; эти значения могут отличаться от сечений
- *6 Значения получены при измерении с гомогенными железоводными смесями занижены на 5—10 %, так как измерения производились для гомогенных
- *7 Экспериментальные сечения, полученные для нейтронов спектра деления.

зует минимальное расстояние, начиная с которого влияние возмущения пластины на спектр детектируемого излучения становится малым.

Закон ослабления мощности дозы нейтронов заданного спектра набором пластин из различных материалов можно представить в виде

$$\dot{D}\left(d, \sum_{i=1}^m t_i\right) = \dot{D}_H\left(d - \sum_{i=1}^m t_i\right) \exp\left[-\sum_{i=1}^m (\Sigma_{\text{выв}_i} t_i)\right], \quad (6.18)$$

где m — число пластин из различных материалов; $\Sigma_{\text{выв}_i}$ и t_i — сечение выведения и толщина слоя вещества i -го компонента соответственно.

Закон ослабления мощности дозы нейтронов для произвольного спектра нейтронов вида $S(E_0)$ выражается соотношением

$$\dot{D}(d, t) = \int S(E_0) \dot{D}_H(d - t, E_0) \exp[-\Sigma_{\text{выв}}(E_0)t] dE_0. \quad (6.19)$$

МэВ					
2,9 ± 0,1	3 [219]	4,0	6,7 [215]	14,9	15,0 [219]
2,34 [218]					1,84 ± 0,10
	1,73 ± 0,11 2,77 ± 0,08				1,64 ± 0,15 1,90 ± 0,12
2,93 ± 0,52* ³ [218]					
	4,79 ± 0,50				3,63 ± 0,40
3,72 ± 0,13 [218]		3,43 ± 0,15* ⁴ [199]	3,76 ± 0,15* ⁷	2,94 ± 0,15* ⁴ [199]	3,39 ± 0,18
	3,78 ± 0,83				3,35 ± 0,20

вместо водородсодержащего вещества. графите и соответствуют обратным значениям длин релаксации на расстоянии выведения, измеренных в водородсодержащей среде. (объемная доля железа 28,5; 44 и 62 %); следует ожидать, что эти результаты железоводных смесей толщиной не более 800 мм. отфильтрованных графитом толщиной 90 см.

Эффективное сечение выведения нейтронов для сложного спектра вида $S(E_0)$ можно определить по формуле

$$\exp(-\Sigma_{\text{выв}_\text{эф}} t) = \frac{\int S(E_0) \dot{D}_H(d - t, E_0) \exp[-\Sigma_{\text{выв}}(E_0)t] dE_0}{\int S(E_0) \dot{D}_H(d - t, E_0) dE_0}. \quad (6.20)$$

В табл. 6.21 приведены сечения выведения для пластин из различных химических элементов для разных энергий нейтронов источников. В табл. 6.22 приведены сечения выведения нейтронов деления для некоторых химических соединений. Сечения выведения бетонов разных составов (см. табл. 6.13) и различного содержания воды приведены на рис. 6.18.

Зависимость массового сечения выведения $\Sigma_{\text{выв}_m}$, см²/г, от атомного номера Z и атомной массы A материала для источника нейтронов деления можно записать в виде эмпирических зависимостей:

Сечения выведения нейтронов деления для некоторых химических соединений [216, 220]

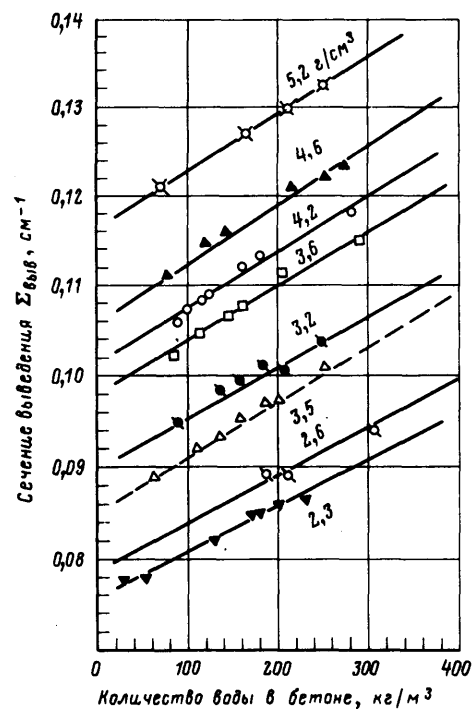


Рис. 6.18. Рассчитанные зависимости сечения выведения быстрых нейтронов в бетоне от количества воды (составы бетонов различной плотности приведены в табл. 6.13) [167]

$$\left. \begin{aligned} \text{для } Z \leq 8 \quad \Sigma_{\text{ввв},m} &= 0,19Z^{-0,743}, \\ \text{для } Z > 8 \quad \Sigma_{\text{ввв},m} &= 0,125Z^{-0,565} \\ \text{или } \Sigma_{\text{ввв},m} &= 0,206A^{-1/3}Z^{-0,294} \approx 0,206(AZ)^{-1/3} \end{aligned} \right\} \quad (6.21)$$

Оценить $\Sigma_{\text{ввв},m}$, $\text{см}^2/\text{г}$, для источников нейтронов деления можно также из соотношений

$$\left. \begin{aligned} \text{при } A > 10 \quad \Sigma_{\text{ввв},m} &= 0,21A^{-0,58} \\ \text{или } \Sigma_{\text{ввв},m} &= (2/3)\bar{\Sigma}_{п,m} \end{aligned} \right\} \quad (6.22)$$

где $\bar{\Sigma}_{п,m}$ — среднее значение полного массового сечения взаимодействия нейтронов для энергий 6—8 МэВ.

Соединение	Плотность, $\text{г}/\text{см}^3$	Сечение выведения, см^{-1}
Алюминиево-карбидоборная смесь (Al:B ₄ C=1:1)	2,6	0,11
Аммиак	0,62	0,091
Борат	3,02	0,088
Бетон (блоки)	2,4	0,080
Бетон тяжелый марок:		
S+S	2,3	0,085
I+I	4,15	0,116
Ba+F	4,0	0,115
I+F	5,0	0,125
D+D	3,5	0,109
D+F	4,38	0,125
S+F	3,56	0,108
Ba+Ba	3,71	0,095
Вода	1,0	0,097
Вода тяжелая D ₂ O	1,10	0,0913
Газолин C ₈ H ₁₈	0,639	0,095
Гравий		0,092
Гидрат кальция Ca(OH) ₂	2,3	0,10
Гидрид лития LiH	0,82	0,083
	0,92	0,140
Гидрид титана	3,92	0,187
Гипс	2,16	0,136
Двуокись кремния SiO ₂	2,32	0,076
Дерево	0,64	$2,5 \cdot 10^{-24} \text{ см}^2$
		[2,5 6]
Доменный шлак	2,29	0,077
Бористое железо	6,0	0,160
Железородная смесь (H ₂ O+60 % стальных высечек по объему)	5,12	0,164
Карбид бора B ₄ C	2,54	0,151
	2,5	0,12
	1,81	0,093
Керосин	0,9	0,125
Кирпич обычный	2,21	0,071
Лимонит	2,73	0,104
Магnezит жженный	3,5	0,109
Мазут очищенный	0,93	0,101
Масло CH ₂		$(2,84 \pm 0,11) \times 10^{-24} \text{ см}^2$
		[2,84 6]
Медно-карбидоборная смесь (Сп:B ₄ C=6,6:1)	8,0	0,18
Медный шлак	2,7	0,089
Нефть	0,82	0,114
	0,876	0,107
	4,0	0,132
Окись алюминия Al ₂ O ₃		$(4,30 \pm 0,41) \times 10^{-24} \text{ см}^2$
Окись бора B ₂ O ₃		[4,30 6]
Окись бериллия BeO	3,0	0,15

Соединение	Плотность, г/см ³	Сечение выведения, см ⁻¹
Окись железа Fe ₂ O ₃	5,12	0,134
Окись калия K ₂ O	2,32	0,060
Окись магния MgO	3,65	0,120
Окись натрия Na ₂ O	2,27	0,075
Парафин C ₃₀ H ₆₂	0,952	0,109
Перфлуоретан C ₇ F ₁₆		(26,3 ± 0,8) × 10 ⁻²⁴ см ²
		[26,3 б]
Песок	2,20	0,082
Полиэтилен (CH ₂) _n	0,93	0,124
	0,92	0,130
Полиэтилен с бором	1,01	0,130
Резина (C ₅ H ₈) _n	0,92	0,098
Свинцово-карбидоборная смесь (Pb:В ₄ C=25:1)	10	0,12
Свинцово-сурьмяная смесь (Pb + 6,5 % Sb)	10,8	0,105
Серпентин, порода	2,08	0,097
Серпентинитовый бетон		0,092
Смола фенолформальдегидная	1,3	0,093
Сталь (1 % углерода)	7,83	0,163
Сталь бористая	7,7	0,205
Сталь бористая (1,57 % В)	7,75	0,166
Сталь бористая нержавеющей	7,0	0,154
Стальные высечки	4,42	0,130
Стальные пластины	7,8	0,208
Стальная дробь (85 % в бетоне)	5,34	0,153
Флуоротен C ₂ Fe ₃ Cl		(6,60 ± 0,8) × 10 ⁻²⁴ см ²
		[6,60 б]
Фторид лития LiF		(2,43 ± 0,34) × 10 ⁻²⁴ см ²
		[2,43 б]
Хризонтит [H ₄ (Mg, Fe) ₃ Si ₂ O ₉]	2,5	0,10
Хэвмет*		(3,22 ± 0,18) × 10 ⁻²⁴ см ²
		[3,226]
Цемент глиноземистый	1,79	0,111
Цемент портландский	1,98	0,075

* Состав хэвмета в массовых долях, %: вольфрам — 90, никель — 6, медь — 4.

В особую группу могут быть отнесены сечения выведения, определенные для коллимированного источника, — так называемые *коллимированные сечения выведения*. Значения этих сечений для нейтронов деления приведены в табл. 6.23.

Коллимированные сечения выведения нейтронов деления [46]

Элемент	Образец	σ _{выв.} , 10 ⁻²⁴ см ² [б]	Элемент	Образец	σ _{выв.} , 10 ⁻²⁴ см ² [б]
Li	LiH	1,34 ± 0,04	Cl	CCl ₄	1,91 ± 0,08
	Li	1,57 ± 0,03	Ti	Ti	2,20 ± 0,07
Be	Be	1,40 ± 0,04		TiH	1,87
B	B ₄ C	1,21 ± 0,02	Fe	Fe	2,26 ± 0,04
C	Графит	От 1,0 ± 0,03 до 1,20 ± 0,02	Ni	Ni	2,32 ± 0,04
			Cu	Cu	2,45 ± 0,05
			Cd	Cd	2,85 ± 0,07
F	Тефлон	1,50 ± 0,05	W	«Мэллори»	3,87 ± 0,11
Na	NaCl	1,60 ± 0,2		1000	
Al	Al	1,61 ± 0,03	Pb	Pb	4,00 ± 0,07
S	S	1,83 ± 0,13	Bi	Bi	3,95 ± 0,08

СЕЧЕНИЕ ВЫВЕДЕНИЯ НЕЙТРОНОВ ДЛЯ ГОМОГЕННЫХ СРЕД

Закон ослабления мощности дозы нейтронов гомогенной смесью водорода с тяжелыми компонентами при массовой доле водорода в смеси не менее 0,3 % можно записать в виде

$$\dot{D}(d) = \dot{D}_H(d) \exp \left[- \sum_{i=1}^n \left(\sigma_{\text{выв}_i} \frac{N_A}{A_i} \rho_i d \right) \right], \quad (6.23)$$

где $\dot{D}(d)$ — мощность дозы, нейтронов на расстоянии d от источника в гомогенной смеси; $\dot{D}_H(d)$ — мощность дозы нейтронов на расстоянии d от источника в чистом водороде с эквивалентной объемной плотностью; $\sigma_{\text{выв}_i}$ — микроскопическое сечение выведения i -го компонента; N_A — число Авогадро; A_i и ρ_i — атомная масса и объемная плотность i -го компонента соответственно.

Сечение выведения $\Sigma_{\text{выв}_\text{эф}}$ для сложного энергетического спектра вида $S(E_0)$ в этом случае можно определить из выражения

$$\exp(-\Sigma_{\text{выв}_\text{эф}} d) = \frac{\int S(E_0) \dot{D}_H(d, E_0) \exp(-\Sigma_{\text{выв}}(E_0) d) dE_0}{\int S(E_0) \dot{D}_H(d, E_0) dE_0}, \quad (6.24)$$

где $S(E_0)$ — дозовый спектр излучения источника; $\dot{D}_H(d, E_0)$ — мощность дозы нейтронов в водороде.

Сечения выведения, измеренные в гомогенных средах (табл. 6.24), могут быть использованы для расчета мощности дозы нейтронов в гетерогенных средах. Различие в сечениях для всех элементов не более 5—10 %.

Таблица 6.24

Сечение выведения нейтронов для однородных сред
($E > 1$ МэВ) [46, 67, 221]

Материал	$\sigma_{\text{выв.}}, 10^{-24} \text{ см}^2$ [б]	Материал	$\sigma_{\text{выв.}}, 10^{-24} \text{ см}^2$ [б]	Материал	$\sigma_{\text{выв.}}, 10^{-24} \text{ см}^2$ [б]	Материал	$\sigma_{\text{выв.}}, 10^{-24} \text{ см}^2$ [б]
Be	0,9	H	$1,00 \pm 0,05$	O	$0,87 \pm 0,05$	Fe	$1,87 \pm 0,1$
C	$0,72 \pm 0,05$ $0,7 \div 0,8$	Li	$0,9 \pm 0,05$ $1,36^*$	Ti	$1,87^*$ $1,70 \pm 0,05$	Zr	$2,37 \pm 0,05$
						Pb	$3,57 \pm 0,2$

* Эксперимент с коллимированным пучком.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СЕЧЕНИЙ ВЫВЕДЕНИЯ НЕЙТРОНОВ ДЛЯ РАСЧЕТА НЕВОДОРОДСОДЕРЖАЩЕЙ ЗАЩИТЫ ОТ НЕЙТРОНОВ

Для нейтронов деления длина релаксации, измеренная детектором с эффективным энергетическим порогом около 3 МэВ в среде, не содержащей водорода, практически совпадает с длиной релаксации, рассчитанной на основании сечения выведения нейтронов (табл. 6.25) [170].

Таблица 6.25

Сравнение сечений выведения с сечениями, полученными из обратных длин релаксации в чистой среде по измерению детекторами с эффективными энергетическими порогами около 3 МэВ [170, 216]

Среда	Сечения выведения нейтронов, 10^{-24} см^2 [б]	Сечения, рассчитанные из длины релаксации, 10^{-24} см^2 [б]
Be	$1,07 \pm 0,06$	1,02
B	$0,97 \pm 0,10$	1,12
C	$0,81 \pm 0,05$	0,89
O	$0,99 \pm 0,10$	0,7
Fe	$2,00 \pm 0,06$	1,81
Ni	$1,89 \pm 0,10$	1,90
Бетон феррофосфорный ($\rho = 4,83 \text{ г/см}^3$)	$0,129 \pm 0,003 \text{ см}^{-1}$	$0,131 \text{ см}^{-1}$
Бетон магнетитомонитовый ($\rho = 3,4 \text{ г/см}^3$)	$0,110 \pm 0,006 \text{ см}^{-1}$	$0,110 \text{ см}^{-1}$
Бетон железолитомонитовый ($\rho = 4,2 \text{ г/см}^3$)	$0,121 \pm 0,005 \text{ см}^{-1}$	$0,126 \text{ см}^{-1}$

Этот вывод оказывается справедливым не только для элементарных сред, но и для сред со сложным химическим составом (табл. 6.25) [180, 216].

Следовательно, сечения выведения нейтронов можно использовать для расчета ослабления нейтронов с энергией $E \geq 3$ МэВ от источника деления в данном веществе.

В заключение параграфа отметим, что метод сечения выведения применим и для защит, в которых в качестве замедлителя вместо во-

доросодержащих используются другие легкие среды, например карбид бора [161].

§ 6.6. ДОЗОВЫЙ СОСТАВ НЕЙТРОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В ЗАЩИТАХ

Часто при измерениях поля нейтронного излучения удается определить плотность потока или мощность дозы, обусловленные нейтронами какой-либо одной энергетической группы (чаще всего быстрых нейтронов). При этом вклад в поле излучения от нейтронов других энергетических групп может быть оценен по известному дозовому составу излучения в среде.

В настоящем параграфе приведены оценки вклада в полную мощность максимальной эквивалентной дозы нейтронов различных энергетических групп: тепловых, медленных, промежуточных и быстрых. Эти данные позволяют рассчитать распределение в защите полной мощности максимальной эквивалентной дозы по дозовому распределению нейтронов какой-либо одной группы.

Дозовые характеристики определялись по данным о пространственно-энергетическом распределении нейтронов $\varphi(d, E)$ с использованием максимальной эквивалентной дозы для единичного флюенса (коэффициент перехода от плотности потока к мощности максимальной эквивалентной дозы) $\delta_{\text{н, макс}}(E)$ (см. рис. 1.9) по формуле

$$\dot{H}_{\text{макс}_i}(d) = \int_{E_{\text{нижн}}}^{E_{\text{верх}}} \varphi(d, E) \delta_{\text{н, макс}}(E) dE, \quad (6.25)$$

где $\dot{H}_{\text{макс}_i}(d)$ — мощность максимальной эквивалентной дозы, создаваемая на расстоянии d от источника нейтронами i -й группы, энергия которых заключена в интервале от $E_{\text{нижн}}$ до $E_{\text{верх}}$.

Полная мощность максимальной эквивалентной дозы

$$\dot{H}_{\text{макс}}(d) = \int_0^{\infty} \varphi(d, E) \delta_{\text{н, макс}}(E) dE = \sum_{i=1}^m \dot{H}_{\text{макс}_i}(d), \quad (6.26)$$

где m — число выделенных энергетических групп.

Вклад в полную мощность максимальной эквивалентной дозы от нейтронов i -энергетической группы (в процентах) может быть определен по формуле

$$n_i(d) = \frac{\dot{H}_{\text{макс}_i}(d)}{\dot{H}_{\text{макс}}(d)} \cdot 100. \quad (6.27)$$

Результаты расчетов для различных материалов при разных значениях граничных энергий нейтронов между группами приведены в табл. 6.26—6.28 (расчеты для максимальной эквивалентной дозы).

Отметим, что в литературе при разбиении нейтронов на энергетические группы принимают разные значения граничных энергий нейтронов различных групп. ГОСТ 15484—81 [1] выделяет следующие энергетические группы нейтронов: *холодные* — со средней энергией нейтронов, меньшей средней энергии атомов окружающей среды; *тепловые* — нейтроны, находящиеся в термодинамическом равновесии

Вклад в полную мощность максимальной эквивалентной дозы нейтронов различных энергетических групп n_i , %, и дозовые коэффициенты накопления подпороговых нейтронов $k_A(d, E_n)$ для разных сред [222—224]

Материал	Плотность, г/см ³	Энергия источника	Толщина защиты, см	n_i для разных энергетических групп нейтронов при различных $E_{гр}$						$k_A(d, E_n) = 2 \text{ МэВ}$
				тепловые ($E \leq 1 \text{ эВ}$)	медленные ($1 \text{ эВ} < E \leq 10^2 \text{ эВ}$)	$E_{гр} = 0,5 \text{ МэВ}$		$E_{гр} = 2,0 \text{ МэВ}$		
						промежуточные ($10^2 \text{ эВ} < E \leq E_{гр}$)	быстрые ($E > E_{гр}$)	промежуточные ($10^2 \text{ эВ} < E \leq E_{гр}$)	быстрые ($E > E_{гр}$)	
Вода	1,0	Нейтроны спектра деления $E_0 = 2 \text{ МэВ}$ $E_0 = 4 \text{ МэВ}$ $E_0 = 6 \text{ МэВ}$ $E_0 = 8 \text{ МэВ}$ $E_0 = 10 \text{ МэВ}$ $E_0 = 14 \text{ МэВ}$ $Р\alpha - \alpha - \text{Be}$ $Р\alpha - \alpha - \text{Be}$ $Р\alpha - \alpha - \text{Be}$	30—120	6,5	0,5	7,5	85,5	38	55	1,82
Углерод	1,67	Нейтроны спектра деления	30—120	15	1	17	67	45	46	2,18
Бериллий	2,3	то же	30—120	8	1	10	81	35	58	1,72
Железо	7,8	»	30—120	6,4	0,6	8	85	29	64,5	1,55
		»	30—120	6	0,5	7	86,5	25	70	1,43
		»	30—120	5	0,4	6	89	18	79	1,27
		»	30—120	2,7	0,3	4	93	31	61	1,64
		»	60 г/см ²	7,4	0,6	7,4	84,6	8,5	1,5	67
		»	60 г/см ²	Не оценен	0,4	3	96	57	42	2,38
		»	50	20	4	29	47	93	—	—
		»	> 90	—	7	93	—	—	—	—

Таблица 6.27

Вклад в полную мощность максимальной эквивалентной дозы нейтронов разных энергетических групп n_i , %, и дозовые коэффициенты накопления подпороговых нейтронов $k_A(d, E_n)$ для различных сред и источника нейтронов спектра деления (для установившегося равновесного спектра нейтронов в среде) [225—228]

Материал	Плотность, г/см ³	n_i для разных энергетических групп нейтронов, МэВ					$k_A(d, E = 2 \text{ МэВ})$	
		тепловые	медленные $0,3 \cdot 10^{-6} \leq E < 6 \cdot 10^{-2}$	промежуточные $6 \cdot 10^{-2} \leq E < 7,4 \cdot 10^{-1}$	быстрые $7,4 \cdot 10^{-1} \leq E < 2$	быстрые $2 \leq E < 10$	Расчет	Эксперимент
Вода	1,0	12,1	3,2	14,2	19,8	50,7	1,98	2,0 ± 0,3
Полиэтилен	0,92	9,2	3,2	14,0	20,4	53,2	1,88* ³	2,0 ± 0,3
Графит с бором ¹	—	$6 \cdot 10^{-5}$	2,8	46,7	29,5	21,0	4,76	—
Гидрид титана	3,25	1,7	5,1	23,8	30,1	39,3	2,55* ⁴	2,3 ± 0,3
Железородная смесь (50 % Fe)	—	2,7	6,7	28,4	33,6	28,4	3,52	—
Серпентинитовый бетон	2,3	5,3	11,1	19,4	23,7	40,4	2,48	2,32 ± 0,3
Обычный бетон (7 % по массе воды)	—	—	—	—	—	—	3,0	—
Обычный бетон (10 % по массе воды)	—	—	—	—	—	—	2,35	—
Полиэтилен с бором ²	—	0,3	3,23	15,8	22,3	58,3	1,71	1,7 ± 0,3
Гидрид циркония	—	—	—	—	—	—	2,65	2,6 ± 0,3

*¹ Массовая доля бора 8 %.

*² Массовая доля естественного бора 2,5 %.

*³ Уточненное значение равно 1,92.

*⁴ Уточненное значение равно 2,32.

с рассеивающими атомами среды; *промежуточные* — нейтроны с энергией в интервале от средней энергии тепловых нейтронов до 200 кэВ; *быстрые* — нейтроны с энергией в интервале от 200 кэВ до 20 МэВ; *сверхбыстрые* — нейтроны с энергией больше 20 МэВ.

В средах, где наиболее проникающими являются быстрые нейтроны (например, вода, полиэтилен, гидрид титана, гидрид циркония, бетон), на расстояниях, больших 2—3 длин релаксации от источника, устанавливается слабо изменяющийся с расстоянием равновесный спектр. На

Таблица 6.28

Вклад в полную мощность максимальной эквивалентной дозы нейтронов разных энергетических групп n_i , %, и дозовые коэффициенты накопления подпороговых нейтронов k_d для различных сортов бетонов и камнебетонов для источника нейтронов спектра деления [229]. (Расчеты для защиты с кратностями ослабления мощности максимальной эквивалентной дозы, включая захватное γ -излучение, $\sim 5 \cdot 10^9$)

Материал	Плотность кг/м ³	Содержание воды, кг/м ³	Толщина за- щиты, см	n_i для разных энергетических групп нейтронов			$k_d(d, E_n =$ $= 1,4 \text{ МэВ})$
				тепловы- $E \leq 5 \text{ эВ}$	промежу- точные $5 \text{ эВ} < E \leq$ $\leq 1,4 \text{ МэВ}$	быстрые $E >$ $> 1,4 \text{ МэВ}$	
Бетон обычный на граните	2350	74	325	62	14,4	23,6	4,2
Камнебетон на граните	2400	48	318	52,6	23	24,4	4,1
Бетон гематитовый	3300	60	280	3,8	45	51,2	1,9
Камнебетон гематитовый	3750	39	247	3,15	63,1	33,75	3,0
Камнебетон гематитовый со свинцовой дробью	4600	60	211	2,54	67,0	30,46	3,3
Камнебетон со свинцовой дробью	4600	39	213	1,74	78,0	20,26	4,9
Бетон серпентинитовый	2050	198	312	30,8	13,0	56,2	1,8
Камнебетон серпентинитовый	2225	234	272	35,0	12,0	53,0	1,9

этих расстояниях дозовый состав излучения сохраняется практически постоянным.

По дозовым распределениям нейтронов в данном материале для широкого набора моноэнергетических источников можно определить дозовое распределение нейтронов в этом материале для источников с произвольным энергетическим распределением.

При реальных измерениях вклад нейтронов низких энергий в мощность максимальной эквивалентной дозы за счет отражения от окружающих рассеивателей может быть больше, чем следует из расчетов, приведенных в табл. 6.26—6.28.

Анализ данных табл. 6.26—6.28 позволяет отметить следующие закономерности: а) при расчете защиты от нейтронного излучения необходимо учитывать возможный вклад в дозу нейтронов всех энергетических групп, при этом в различных защитных материалах определяющими полную дозу являются нейтроны разных энергетических групп (особо следует помнить о нейтронах промежуточных энергий, которые в силу известных трудностей часто на практике не измеряются); б) изменение граничных энергий между группами E_{gr} может значительно изменять распределение нейтронов по группам (это обстоятельство

надо иметь в виду при интерпретации результатов измерений и сравнении расчетных данных с экспериментальными).

§ 6.7. КОЭФФИЦИЕНТЫ НАКОПЛЕНИЯ ПОДПОРОГОВЫХ НЕЙТРОНОВ

Дозовый коэффициент накопления подпороговых нейтронов определяется как отношение мощности максимальной эквивалентной дозы нейтронов всех энергий к мощности максимальной эквивалентной дозы нейтронов с энергией выше пороговой величины E_n^* . Аналогично можно ввести коэффициент накопления для числа или энергии подпороговых нейтронов.

Дозовый коэффициент накопления подпороговых нейтронов определяется из соотношения [227]

$$k_d(d, E_n) = \frac{\dot{H}_{\text{макс.б}}(d, E_n) + \dot{H}_{\text{макс.т.м.п}}(d, E_n)}{\dot{H}_{\text{макс.б}}(d, E_n)} = 1 + \frac{\dot{H}_{\text{макс.т.м.п}}(d, E_n)}{\dot{H}_{\text{макс.б}}(d, E_n)}, \quad (6.28)$$

где $\dot{H}_{\text{макс.б}}(d, E_n)$ — мощность максимальной эквивалентной дозы быстрых нейтронов с энергией выше пороговой величины E_n ; $\dot{H}_{\text{макс.т.м.п}}(d, E_n)$ — суммарная мощность максимальной эквивалентной дозы тепловых, медленных и промежуточных нейтронов (подпороговых нейтронов) с энергией $E < E_n$; d — координата точки определения коэффициента накопления.

Коэффициенты $k_d(d, E_n)$ могут быть определены экспериментально или рассчитаны, например, исходя из данных табл. 6.26—6.28 о дозовом распределении нейтронного излучения в средах.

В области установившегося спектра коэффициент накопления подпороговых нейтронов сохраняется постоянным. Коэффициент накопления подпороговых нейтронов удобно использовать при определении полной мощности максимальной эквивалентной дозы нейтронов $\dot{H}_{\text{макс}}(d)$ по известной мощности максимальной эквивалентной дозы одной группы нейтронов, например быстрых нейтронов. В этом случае

$$\dot{H}_{\text{макс}}(d) = \dot{H}_{\text{макс.б}}(d, E_n) k_d(d, E_n). \quad (6.29)$$

Величину $\dot{H}_{\text{макс.б}}(d, E_n)$ определяют, например, используя метод длин релаксации (§ 6.4) или концепцию сечения выведения (§ 6.5).

Подобно формуле (6.28) могут быть введены понятия дозовых коэффициентов накопления промежуточных нейтронов

$$k_d^n(d) = 1 + \dot{H}_{\text{макс.п}}(d) / \dot{H}_{\text{макс.б}}(d) \quad (6.30)$$

и дозовых коэффициентов накопления тепловых нейтронов

$$k_d^t(d) = 1 + \dot{H}_{\text{макс.т}}(d) / \dot{H}_{\text{макс.б}}(d). \quad (6.31)$$

Значения дозовых коэффициентов накопления подпороговых нейтронов приводятся в табл. 6.26—6.28; значения коэффициентов на-

* Аналогично можно ввести понятие дозового коэффициента накопления подпороговых нейтронов, рассчитанного по поглощенной дозе.

Таблица 6.29

Величины $(k_d^n - 1)$ и $(k_d^r - 1)$ для источника нейтронов деления в различных бетонах^{*1} (химические составы приведены в табл. 6.13) [167]

Плотность, г/см ³	$(k_d^n - 1)$ для промежуточных нейтронов ^{*2}						$(k_d^r - 1)$ для тепловых нейтронов ^{*2}					
	Номер бетона						Номер бетона					
	1	2	3	4	5	6	1	2	3	4	5	6
2,3	10,3	3,4	2,3	1,9	1,8	1,6	205	2,80	0,95	0,61	0,58	0,5
2,6	2,0	1,4	1,1	1,0	0,9	0,9	0,12	0,10	0,08	0,05	—	—
3,2	4,2	3,0	2,7	2,3	2,1	1,9	0,11	0,07	0,05	0,05	0,04	0,03
3,5	6,3	3,6	2,5	2,5	2,1	2,0	0,35	0,19	0,15	0,13	0,12	0,11
3,6	5,2	4,3	3,4	3,0	2,4	1,8	0,10	0,08	0,07	0,06	0,03	—
4,2	7,4	6,2	5,0	3,9	3,4	2,2	0,06	0,05	0,04	0,03	0,02	—
4,6	11,7	6,1	5,4	3,4	2,8	2,3	0,11	0,08	0,05	0,03	0,02	—
5,2	23,2	6,0	4,3	3,5	—	—	0,29	0,09	0,03	0,01	—	—

^{*1} Значения рассчитаны для толщины защиты более 1 м; для бетона № 1 плотностью 2,3 г/см³ — для толщины более 3 м.

^{*2} К быстрым нейтронам отнесены нейтроны с энергией $E > 1,5$ МэВ.

копления k_d^n и k_d^r для различных бетонов можно определить из данных табл. 6.29. Все расчетные данные приведены для максимальной эквивалентной дозы.

Для оценок значений коэффициентов накопления подпороговых нейтронов для источников нейтронов реактора полезны также приводимые ниже рекомендации [168, 227].

Водородсодержащие среды. Наиболее проникающая группа нейтронов для таких сред — быстрые нейтроны. На расстоянии от источника, большем 2—4 длин релаксации нейтронов источника, в таких средах устанавливается равновесный спектр нейтронов, слабо изменяющийся с дальнейшим увеличением толщины защиты. Поэтому и значение коэффициента $k_d(d, E_n)$ сохраняется с ростом d на указанной толщине среды практически постоянным. Из данных табл. 6.26 и 6.27 видно, что для источников нейтронов деления при $E_n = 2$ МэВ $k(d, E_n) \approx 2 \div 2,5$, т. е. примерно половина от полной мощности максимальной эквивалентной дозы нейтронов приходится на быстрые нейтроны.

Материалы, не содержащие водород. Для этой группы сред не устанавливается равновесный спектр. Наиболее проникающими для таких сред являются обычно нейтроны с энергиями меньше 0,5—1,0 МэВ. В тяжелых средах (свинец, железо, титан, вольфрам, молибден) коэффициент $k_d(d, E_n)$ постоянно возрастает с увеличением d и зависит от дозового состава нейтронов, падающих на защиту, или, другими словами, от дозового коэффициента накопления подпороговых нейтронов $k_d(0, E_n)$ при $d=0$. При этом

$$k_d(d, E_n) = 1 + [k_d(0, E_n) - 1] \exp(+bd), \quad (6.32)$$

где $b = 1/L_6 - 1/L_{т.м.п.}$. b — коэффициент, численно равный 0,102 см⁻¹

для железа (Ст3); 0,096 см⁻¹ для стали Х18Н10Т; 0,072 см⁻¹ для свинца; 0,056 см⁻¹ для титана; 0,061 см⁻¹ для вольфрама; 0,068 см⁻¹ для молибдена. Так как для тяжелых сред $L_{т.м.п.} > L_6$, то значение $k_d(d, E_n)$ повышается с ростом d .

Металловодородсодержащие защиты. В однородных металловодородсодержащих защитах в области установившегося спектра при объемных долях металлов $c_T \leq 0,8$

$$k_d(d; E_n = 2 \text{ МэВ}) = k_{дн}(d; E_n = 2 \text{ МэВ})(1 - c_T)^{-\alpha}, \quad (6.33)$$

где $k_{дн}(d, E_n = 2 \text{ МэВ})$ — дозовый коэффициент накопления подпороговых нейтронов в водородсодержащей компоненте (вода, полиэтилен); константа $\alpha = 1,0$ для смесей воды или полиэтилена с железом или 0,53 для смесей воды или полиэтилена со свинцом.

Многослойная защита. Защита реальных ядерно-технических установок обычно бывает гетерогенной.

Для двухслойных защит из тяжелого (вблизи источника) и легкого материалов (рис. 6.19) эффект накопления замедляющихся нейтронов в первом слое полностью компенсируется вторым, когда толщина легкого материала составляет примерно 4—5 длин релаксации быстрых нейтронов. При такой толщине второго слоя $k_d(d, E_n)$ принимает значение, характерное для бесконечной среды из материала второго слоя, и с увеличением толщины этого слоя остается практически постоянным. В первом слое накопление низкоэнергетических нейтронов происходит в соответствии с соотношением (6.32). Таким образом, зависимость $k_d(d, E_n)$ в двухслойной композиции зависит от формы спектра нейтронов, падающих на слой из тяжелого материала, или, иными словами, от $k_d(d=0, E_n)$ и ядерно-физических свойств тяжелого и легкого материалов.

Экспериментальные исследования с многослойными композициями [168, 227] показали, что изложенный выше метод расчета $k_d(d, E_n)$ для двухслойных сред можно распространить на защиту с любым коли-

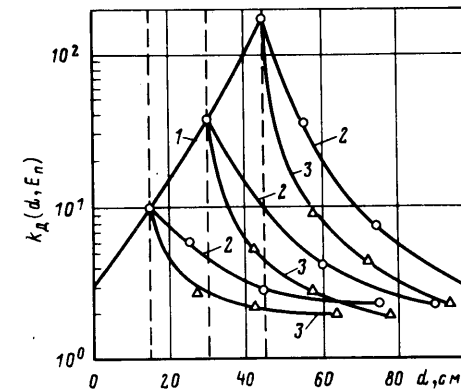


Рис. 6.19. Зависимость коэффициента $k_d(d, E_n = 2 \text{ МэВ})$ от толщины среды из железа (1), из железа и серпентинитового бетона (2), из железа и полиэтилена с бором (3). Вертикальной пунктирной линией показана граница раздела сред

чеством слоев, если при этом значение $k_d(d, E_n)$; полученное в конце первой двухслойной композиции, становится начальным значением $k_d(0, E_n)$ для второй пары слоев и т. д. При наличии «непарных» слоев k_d вычисляют для каждого из них отдельно.

§ 6.8. НОМОГРАММЫ ДЛЯ РАСЧЕТА ВОДНОЙ ЗАЩИТЫ ОТ НЕЙТРОНОВ (α, n)-ИСТОЧНИКОВ

В настоящем параграфе приведены номограммы трех типов для расчета (по максимальной эквивалентной дозе) защиты от нейтронов наиболее широко используемых лабораторных (α, n)-источников: $Po-\alpha-Be$, $Ra-\alpha-Be$, $Pu-\alpha-Be$, $Po-\alpha-B$ [189, 190].

Номограммы построены по данным пространственно-энергетического распределения нейтронов в бесконечной водной среде от точечных моноэнергетических источников, рассчитанным методом моментов [149]. Оценки показывают, что для барьерных защит можно ожидать уменьшения полной дозы на границе по сравнению с расчетами по номограммам приблизительно на 25–50 %.

Номограммы первого типа (рис. 6.20 и 6.21) связывают мощность источника S , расстояние от источника до точки детектирования R и толщину водной защиты d . Номограммы построены для времени об-

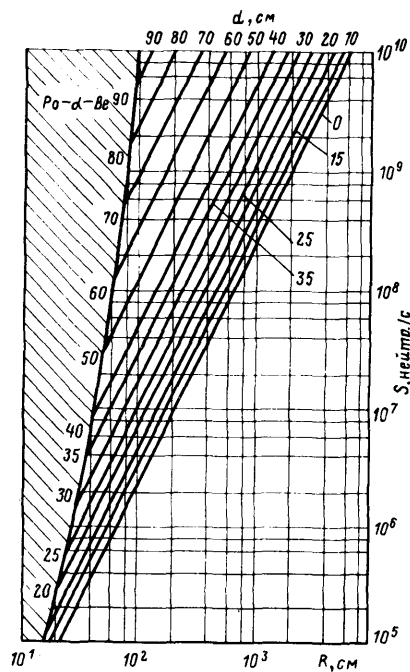


Рис. 6.20. Номограмма первого типа для расчета защиты от нейтронов ($Po-\alpha-Be$)-источника

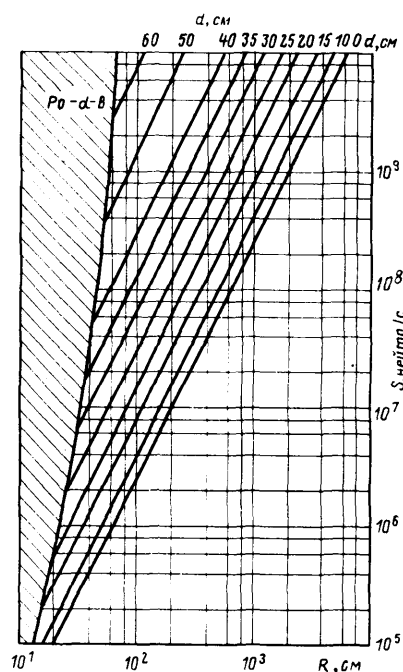


Рис. 6.21. Номограмма первого типа для расчета защиты от нейтронов ($Po-\alpha-B$)-источника

чения 36 ч/неделя и предельно допустимой дозы для персонала (категория облучения А) 1 мЗв/неделя.

Номограммы второго типа (рис. 6.22) показывают зависимость кратности ослабления k от толщины водной защиты для разных источников нейтронов.

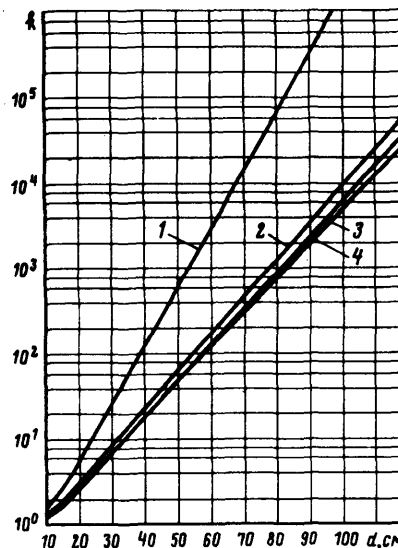
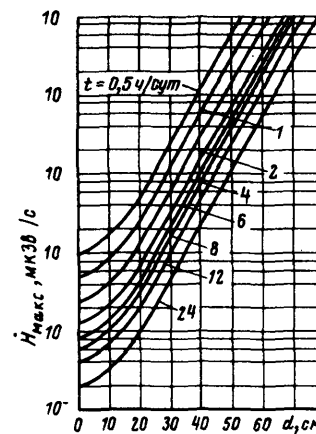
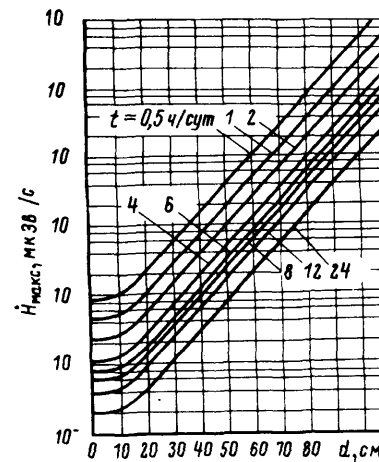


Рис. 6.22. Номограмма второго типа для расчета защиты по кратности ослабления водой для источников: 1 — $Po-\alpha-B$; 2 — $Ra-\alpha-Be$; 3 — $Po-\alpha-Be$; 4 — $Pu-\alpha-Be$

Рис. 6.23. Номограмма третьего типа для расчета защиты от нейтронов ($Po-\alpha-Be$)-источника в зависимости от мощности максимальной эквивалентной дозы H_{\max} и времени облучения t , ч/сут, при шестидневной рабочей неделе

Рис. 6.24. Номограмма третьего типа для расчета защиты от нейтронов ($Po-\alpha-B$)-источника в зависимости от мощности максимальной эквивалентной дозы H_{\max} и времени облучения t , ч/сут, при шестидневной рабочей неделе



... номограммы третьего типа (рис. 6.23 и 6.24) связывают между собой измеренную или рассчитанную мощность максимальной эквивалентной дозы, время облучения и толщину защиты. Номограммы построены для предельно допустимой дозы для персонала.

Номограммы первого и третьего типов для (Po-α-Be)-источника могут быть с достаточной точностью применены для (Pu-α-Be)-источников и с несколько худшей точностью для (Ra-α-Be)-источников. Неточность в этом случае можно оценить исходя из номограммы второго типа, по которой определяют длину релаксации нейтронов по дозе (табл. 6.30).

Таблица 6.30

Длина релаксации нейтрона L по максимальной эквивалентной дозе в воде для различных источников

Источник	L , см	Источник	L , см
Po-α-B	6,3	Po-α-Be	10,3
Ra-α-Be	9,8	Pu-α-Be	10,5

В случае расчетов для предельно допустимых доз, отличных от условий профессионального облучения, следует вводить фиктивную мощность источника для номограмм первого типа или фиктивную мощность дозы для номограмм третьего типа. Значения фиктивных мощностей источника и мощностей дозы должны отличаться от истинных значений во столько раз, во сколько предельно допустимая доза для персонала отличается от принятой для данной задачи предельно допустимой дозы.

Аналогичным образом можно ввести поправку на время работы, отличное от принятого в расчетах.

При расчете защиты из парафина следует учитывать, что длина релаксации в парафине меньше длины релаксации в воде в 1,2 раза для (Po-α-B)-источника и в 1,16 раза для (Po-α-Be)-источника. При расчете защиты лабораторных нейтронных источников необходимо известными способами (см. гл. 5) проверять пригодность выбранной защиты и от γ-излучения.

§ 6.9. АКТИВАЦИЯ МАТЕРИАЛОВ В ПОЛЕ НЕЙТРОНОВ

Для расчета наведенной активности удобно ввести понятие активационного интеграла q [230, 231], характеризующего скорость протекания реакции. Отнесенный к одному ядру изотопа мишени активационный интеграл

$$q = \int_0^{\infty} \sigma(E)\varphi(E)dE, \quad (6.34)$$

где $\sigma(E)$ — энергетическая зависимость сечения активации; $\varphi(E)$ — энергетический спектр нейтронов.

Объемная наведенная активность A_V изотопа продукта реакции с постоянной распада λ в материале с первоначальным числом атомов изотопа мишени в единице объема n_0 за время облучения T в стабильном потоке нейтронов через время после окончания облучения t в потоке нейтронов с энергетическим спектром $\varphi(E)$, сечением активации $\sigma(E)$,

сечением выгорания изотопа продукта реакции $\sigma^*(E)$, активационными интегралами $q = \int_0^{\infty} \sigma(E)\varphi(E)dE$, $q^* = \int_0^{\infty} \sigma^*(E)\varphi(E)dE$ определяется по следующим формулам:

а) с учетом выгорания ядер изотопа мишени и изотопа продукта реакции:

$$A_V = \frac{\lambda n_0 q [1 - e^{-(\lambda + q^* - q)T}]}{\lambda + q^* - q} e^{-qT} e^{-\lambda t}, \quad (6.35)$$

б) с учетом выгорания изотопа продукта реакции, пренебрегая выгоранием ядер изотопа мишени:

$$A_V = \frac{\lambda n_0 q [1 - e^{-(\lambda + q^*)T}]}{\lambda + q^*} e^{-\lambda t}, \quad (6.36)$$

в) без учета процессов выгорания:

$$A_V = n_0 q (1 - e^{-\lambda T}) e^{-\lambda t}. \quad (6.37)$$

Для большинства практических задач процессами выгорания можно пренебречь и пользоваться формулой (6.37).

Если активация происходит только на тепловых нейтронах, то в формулах (6.35) — (6.37) $q = \sigma_{т.н} \varphi_{т.н}$, $q^* = \sigma_{т.н}^* \varphi_{т.н}$ и тогда, например, формула (6.37) запишется в виде

$$A_V = n_0 \sigma_{т.н} \varphi_{т.н} (1 - e^{-\lambda T}) e^{-\lambda t}. \quad (6.38)$$

Если при этом n_0 выразить в числе ядер в 1 см³, $\sigma_{т.н}$ в см², $\varphi_{т.н}$ в 1/(см²·с), то объемную активность A_V определим в Бк/см³.

Если в процессе активации наряду с основным изотопом (G) с постоянной распада λ_G образуется его изомер (M) с постоянной распада λ_M , распадающийся с вероятностью p_M на основной уровень, а активационные интегралы для основного и изомерного состояний равны q_G и q_M соответственно, то объемная наведенная активность основного изотопа без учета процессов выгорания [230]

$$A_{V_G} = n_0 \left(q_G + p_M \frac{\lambda_M}{\lambda_M - \lambda_G} q_M \right) (1 - e^{-\lambda_G T}) e^{-\lambda_G t} - p_M \frac{\lambda_G}{\lambda_M - \lambda_G} n_0 q_M (1 - e^{-\lambda_M T}) e^{-\lambda_M t}. \quad (6.39)$$

Если $\lambda_M T \gg 1$; $T_M \ll T_G$; $\lambda_M \gg \lambda_G$, то соотношение (6.39) переходит в

$$A_{V_G} = n_0 (q_G + p_M q_M) (1 - e^{-\lambda_G T}) e^{-\lambda_G t}. \quad (6.40)$$

Для нестабильного по времени потока нейтронов можно обычно выделить некоторое число l временных интервалов, когда в течение j -го интервала T_j плотность потока φ_j можно считать стабильной. Тогда полная наведенная активность определяется суперпозицией наведенных активностей от каждого j -го интервала. Например, в этом случае, формула (6.37) приобретает вид

Диапазон изменения содержания, среднее содержание по массе и среднее квадратичное отклонение содержания σ основных, второстепенных элементов и элементов примесей на уровне следов в нержавеющей стали марки 304 L и в бетоне биологической защиты ядерных реакторов по [240], $10^{-4}\%$

Элемент	Нержавеющая сталь марки 304 L ¹				Бетон биологической защиты ²			
	Диапазон изменения	Среднее содержание	σ	Число измерений	Диапазон измерения	Среднее содержание	σ	Число измерений
H		0,13		1		6100		2
Li						20		2
B						20		2
N	402—525	452	64	3	176—18940	120		11
Na	3—37	9,7	12,2	7	(0,53—6,1) · 10 ⁴	7390	7640	11
Al	<50—200	100		6	(3,9—32,4) · 10 ⁴	3,1 · 10 ⁴	2,0 · 10 ⁴	11
Si						16,8 · 10 ⁴	9,5 · 10 ⁴	12
P						<0,5 · 10 ⁴		12
S						3100	1000	12
Cl	<50—130	70		5	2000—4600	45	18	8
K		<3		3	(0,047—2,5) · 10 ⁴	0,75 · 10 ⁴	0,67 · 10 ⁴	12
Ca		19		1	(8,8—34,7) · 10 ⁴	18,3 · 10 ⁴	9,7 · 10 ⁴	12
Sc		<0,03		10	0,73—17,4	6,5	6,3	11
Ti		<600		10	230—7900	2120	2320	12
V	140—690	456	235	9	13,3—490	103	140	11
Cr	(16,5—20,2) · 10 ⁴	18,4 · 10 ⁴	1,1 · 10 ⁴	13	29,0—540	109	159	11
Mn	(1,11—1,76) · 10 ⁴	1,53 · 10 ⁴	0,27 · 10 ⁴	13	56—990	377	290	12
Fe	(68,0—76,7) · 10 ⁴	70,6 · 10 ⁴	2,6 · 10 ⁴	13	(0,5—24,0) · 10 ⁴	3,9 · 10 ⁴	6,1 · 10 ⁴	12
Co	229—2570	1414	800	8	1,1—31,0	9,8	10,3	11
Ni	(8,8—11,0) · 10 ⁴	10,0 · 10 ⁴	0,7 · 10 ⁴	13	11,9—87	38	25	12
Cu	300—8150	3080	2270	13	10—60	25	17	12
Zn	<15—2230	457	717	12	8,4—340	75	90	12
Ga	<40—450	129	143	13	1,05—20,0	8,8	6,4	12
As	<57—1010	194	259	13	0,89—29,0	7,9	7,9	12
Se	<2—70	35		13	0,26—2,0	0,92	0,56	7

Продолжение табл. 6.31

Элемент	Нержавеющая сталь марки 304 L ¹				Бетон биологической защиты ²			
	Диапазон изменения	Среднее содержание	σ	Число измерений	Диапазон измерения	Среднее содержание	σ	Число измерений
Br	<0,9—8,0	3		8	1,0—5,6	2,5	1,5	9
Rb	<10	<10		9	2,5—170	35	44	12
Sr		0,2		1	220—940	438	238	12
Y	<5	<5		12	3,0—96	18,2	25,6	12
Zr	<4—20	10		13	27—160	71	44	12
Nb	<5—300	89	90	13	1,3—9,3	4,3	3,0	12
Mo	80—5500	2600	1500	13	1,8—36	10,3	10,0	12
Ag	<2	<2		8		<0,2		12
Sb	6,9—17,0	1,2	3,8	8	0,16—13,0	1,8	3,7	11
Cs	<0,3	<0,3		5	0,32—6,2	1,3	1,8	10
Ba	<500	<500		8	<20—7060	950	1950	12
La	<0,05—2,1	0,2		8	2,9—28	13,0	6,9	11
Ce	<2—550	371	212	8	6,2—52	24,3	13,5	11
Sm	<0,05—0,15	0,1		7	0,42—4,2	2,0	1,3	11
Eu		0,02		3	0,11—1,2	0,55	0,38	11
Tb	0,22—0,71	0,47	0,25	3	0,11—0,78	0,41	0,24	11
Dy	<1	<1		5	0,55—4,3	2,3	1,3	7
Ho	<1	<1		3		0,9		
Yb	<2	<2		5	0,38—3,0	1,4	0,9	11
Lu	<0,8	<0,8		7	0,15—0,5	0,27	0,13	11
Hf	<2	<2		3	0,65—5,7	2,2	1,5	11
Ta				8	0,092—0,90	0,44	0,31	11
W	7,2—520	186	149	8	0,39—3,9	1,4	1,1	11
Pb	<10—139	67	50	9	5,4—560	61	158	12
Th	<1	<1		3	0,75—12	3,5	3,0	11
U	<2	<2		3	1,4—4,4	2,7	0,9	11

¹ Данные анализа 15 образцов из различных источников.² Данные анализа 36 образцов из 13 реакторов.

$$A_V = n_0 \sum_{j=1}^I q_j (1 - e^{-\lambda T_j}) e^{-\lambda t_j}, \quad (6.41)$$

где $q_j = \int_0^{\infty} \sigma(E) \varphi_j(E) dE$; t_j — время «выдержки» после облучения для j -го интервала.

Заметим, что в приведенных выше формулах число атомов изотопа мишени в единице объема n_0 , атом/см³,

$$n_0 = \rho \frac{N_A}{A}, \quad (6.42)$$

где ρ — относительное содержание изотопа мишени в химическом элементе; ρ — плотность материала мишени, г/см³; N_A — число Авогадро; A — атомная масса изотопа мишени.

Удельную активность A_m можно рассчитать из простого соотношения

$$A_m = A_V / \rho. \quad (6.43)$$

Приведенные формулы справедливы, если в пределах рассматриваемого активируемого объема можно пренебречь изменением нейтронного потока вследствие поглощения и рассеяния.

Пользуясь сечениями активации из § 6.1, можно рассчитать наведенную активность в конструкционных, строительных и защитных материалах ядерно-энергетических установок. Наведенная активность является одним из основных источников остановленной ядерно-энергетической установки и определяет значительные дозовые нагрузки при выполнении работ по снятию установки с эксплуатации (см., например, [232—243]), при выполнении ремонтных работ и т. д. Для расчетов наведенной активности необходимо знать содержание в материалах не только основных и второстепенных элементов, но также и элементов примесей на уровне следов (табл. 6.31), так как именно последние могут определять активность материалов. Отметим, что элементы примесей на уровне следов часто изменяются в очень широких пределах, например средняя величина ⁶⁰Со в нержавеющей стали по данным табл. 6.31 больше, чем наименьшее значение более чем в 6 раз.

§ 6.10. ВТОРИЧНОЕ γ -ИЗЛУЧЕНИЕ В ЗАЩИТАХ

Напомним, что под вторичным понимается ионизирующее излучение, возникающее в результате взаимодействия первичного излучения с рассматриваемой средой.

Одним из наиболее проникающих видов вторичного излучения является *вторичное γ -излучение* в защите, сопровождающее захват и неупругое рассеяние нейтронов на ядрах изотопов конструкционных, строительных материалов и материалов биологической защиты.

Высокие потоки нейтронов в защитах ядерно-технических установок могут создавать высокую плотность источников вторичного γ -излучения. Поэтому в ряде случаев радиационная обстановка за защитой ядерно-технических установок целиком определяется вторичным γ -излучением. Эти вопросы подробно рассмотрены в [72, 139].

Таблица 6.32
Групповые выходы γ -излучения при радиационном захвате тепловых нейтронов (фотоны в группе на 100 захватов)

$\Delta E, \text{ МэВ}$	¹ H	² H	⁶ Li	⁷ Li	Be	¹⁰ B	C	¹⁴ N	¹⁶ O	F	Na	Mg	Al
0,00—0,25	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4,21	48,56	0,56	25,83
0,25—0,50	0	0	39,00	0	0	0	0	0	0	0	93,31	8,23	0,59
0,50—0,75	0	0	0	0	0	0	0	0	100,00	82,38	2,07	59,24	0,17
0,75—1,00	0	0	0	10,60	25,70	0	0	0	82,00	14,38	39,88	14,53	4,36
1,00—1,25	0	0	0	10,60	0	0	0	0	0	11,66	0	15,99	2,81
1,25—1,50	0	0	0	0	0	0	32,90	9,38	0	18,99	14,10	4,73	4,07
1,50—1,75	0	0	0	0	0	0	0	26,58	0	2,33	7,20	6,78	6,18
1,75—2,00	0	0	0	89,40	0	0	0,04	0	82,00	10,40	6,54	35,73	2,00
2,00—2,25	100,0	0	0	0	0	8,00	0	0	0	5,23	15,04	3,47	4,55
2,25—2,50	0	0	0	0	24,00	14,30	0	5,95	0	12,00	17,78	9,28	6,34
2,50—2,75	0	0	0	0	0	0	0	1,69	0	11,71	8,57	6,78	7,60
2,75—3,00	0	0	0	0	0	0	0	0,65	0	3,35	23,32	41,42	13,50
3,00—3,25	0	0	0	0	0	0	0	0,16	0	13,25	12,27	12,46	8,40
3,25—3,50	0	0	0	0	46,20	0	0	26,25	18,00	10,46	5,60	15,98	9,54
3,50—3,75	0	0	0	0	0	0	32,90	1,50	0	6,08	16,33	10,16	6,52
3,75—4,00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4,72	20,86	55,53	8,14
4,00—4,25	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,62	3,31	3,34	8,51
4,25—4,50	0	0	0	0	0	62,00	0	0	0	7,39	1,83	1,99	8,51
4,50—4,75	0	0	0	0	0	26,00	0	15,62	0	2,33	0,93	1,49	13,74
4,75—5,00	0	0	0	0	0	0	66,80	0	0	6,60	1,41	3,88	4,94
5,00—5,25	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1,25	1,25	1,79	4,12
5,25—5,50	0	0	0	0	0	0	0	53,10	0	9,78	0	3,87	3,21
5,50—5,75	0	0	0	0	0	0	0	29,13	0	6,68	5,05	1,19	1,90
5,75—6,00	0	0	0	0	1,70	0	0	0	0	1,08	0,29	0,66	0,91
6,00—6,25	0	0	0	0	0	0	0,04	0	0	10,35	0	0,33	3,86
6,25—6,50	0	0	0	0	0	0	0	18,15	0	0	20,22	2,41	3,14
6,50—6,75	0	100,0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1,26	1,50
6,75—7,00	0	0	39,00	0	0	18,00	0	0	0	10,69	0	0,52	0,49
7,00—7,25	0	0	61,00	0	63,20	54,00	0	0	0	0	0	0,21	0,26
7,25—7,50	0	0	0	0	0	0	0	9,30	0	0	0	0,13	0,10

ΔE_{γ} , МэВ	^1H	^2H	^6Li	^7Li	Be	^{10}B	C	^{14}N	^{16}O	F	Na	Mg	Al
7,50—7,75						0	0	0				0,18	35,55
7,75—8,00						0	0	0				0,11	
8,00—8,25						0	0,26	0				4,60	
8,25—8,50						0		3,65				0,025	
8,50—8,75						0		0,08				0,16	
8,75—9,00						14,30		0				0,074	
9,00—9,25						0		1,80				0,023	
9,25—9,50						0		0				0,86	
9,50—9,75						0		0				0	
9,75—10,00						0		0,18				0,018	
10,00—10,25						0		0,05				0,013	
10,25—10,50						0		0				0	
10,50—10,75						0		0				0	
10,75—11,00						0		13,77				0	
11,00—11,25						0						0	
11,25—11,50						5,70						0,026	

ΔE_{γ} , МэВ	Si	P	S	Cl	Ar	K	Ca	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co
0,00—0,25	0	29,92	0	0	67,98	88,48	3,94	3,46	26,60	0	49,80	6,12	28,48
0,25—0,50	0,006	0	0	1,41	7,66	1,98	1,45	41,21	15,90	0,07	23,43	15,78	37,69
0,50—0,75	0	67,17	0,14	21,88	27,54	6,39	14,49	0,52	15,34	16,56	1,96	11,46	18,53
0,75—1,00	2,15	0	68,50	24,31	11,15	55,68	0,81	2,56	14,42	36,95	2,72	3,19	11,41
1,00—1,25	0,75	19,50	0,42	27,92	58,41	15,24	4,64	1,33	2,21	2,38	6,04	3,02	5,80
1,25—1,50	19,14	3,89	0,49	1,82	3,83	11,00	5,91	91,66	7,57	0,11	8,21	6,83	2,15
1,50—1,75	1,49	5,34	3,42	6,44	0,09	16,29	4,42	11,24	9,66	0,32	9,95	22,45	7,97
1,75—2,00	1,24	5,14	4,09	33,89	4,09	10,37	83,23	8,44	9,11	10,22	2,82	0,35	13,79
2,00—2,25	21,42	20,99	2,49	5,19	5,35	27,95	27,67	0,73	8,04	8,05	14,58	2,41	5,12
2,25—2,50	3,03	1,10	45,57	8,31	2,69	12,13	2,45	0,26	1,88	6,00	7,92	1,18	4,65
2,50—2,75	0,26	7,63	0,096	8,16	6,04	8,25	4,04	0,56	0,54	4,03	5,05	3,85	4,53
2,75—3,00	1,59	5,29	21,15	14,32	19,18	8,69	8,71	1,87	2,18	0,70	4,22	2,87	4,30
3,00—3,25	2,21	8,03	25,27	8,07	4,89	6,01	0,88	3,78	0,52	3,09	3,72	3,48	4,12
3,25—3,50	0,24	8,08	5,30	3,73	5,50	10,95	0,96	1,82	0,88	1,51	6,97	6,59	3,82

ΔE_{γ} , МэВ	Si	P	S	Cl	Ar	K	Ca	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co
3,50—3,75	66,54	14,56	2,62	5,18	9,64	13,57	11,18	3,20	3,42	3,99	3,43	0,94	4,38
3,75—4,00	3,05	25,08	0,074	4,32	0,06	8,90	3,64	2,21	1,00	1,17	4,73	1,68	4,29
4,00—4,25	0,03	4,09	0,039	2,90	0,55	11,18	0,20	0,24	2,50	0,82	2,96	4,28	4,58
4,25—4,50	0,16	7,53	4,87	2,45	0,08	8,74	19,06	0,46	2,02	2,08	3,28	2,87	4,16
4,50—4,75	0,37	18,00	1,15	3,50	54,31	2,24	4,45	1,99	0,91	0,49	7,86	1,00	3,92
4,75—5,00	60,37	2,99	12,78	6,61	0,06	3,09	3,01	9,00	2,77	1,59	6,19	2,76	6,07
5,00—5,25	3,94	1,40	3,82	2,02	0,43	8,26	1,13	0,21	9,79	0,95	14,80	0,31	6,32
5,25—5,50	0,55	5,59	60,10	0,92	0,63	8,99	1,37	0,22	0,43	2,32	4,34	0,41	2,94
5,50—5,75	0,03	4,44	1,87	8,72	11,72	12,30	5,25	0,88	9,48	4,66	6,92	0,46	13,75
5,75—6,00	0,066	1,20	0,96	1,76	0	6,25	8,23	0,56	10,19	3,48	2,75	8,84	9,84
6,00—6,25	0,65	1,50	0,006	20,57	0	0,12	0,18	0,28	0,19	2,14	2,47	8,80	2,08
6,25—6,50	12,59	0,40	0	1,41	0,94	0,27	42,37	29,92	9,97	2,59	0,71	0,93	8,61
6,50—6,75	1,08	1,60	0,41	13,15	0	0,04	0,065	4,95	17,87	5,25	0,44	0,20	8,53
6,75—7,00	0,19	18,65	0	2,43	0	2,95	0,030	43,90	10,43	1,14	5,51	0,36	12,37
7,00—7,25	8,77	0	0,37	0	0	0,24	0,028	0,58	13,30	4,22	27,98	0,12	7,96
7,25—7,50	0,015	5,93	0,42	9,86	0	0,14	0,083	0,11	8,25	6,19	3,35	5,63	3,35
7,50—7,75	0	0	3,87	8,49	0	6,08	0,082	0,04	0,19	0		50,70	
7,75—8,00	0	1,90	0	0	0	0	0,015	0,12	0	0		0	
8,00—8,25	0,10	0	0	0	0	0	0,001	0,18	0,024	5,61		0,26	
8,25—8,50	2,48	0	2,44	0	0	0	0	0	0	7,67		0,68	
8,50—8,75	0	0	0	2,90	0,28	0	0,007	0	0	26,50		0,05	
8,75—9,00	0,03	0	0	0	0	0	0	0,14	0,032	0		3,61	
9,00—9,25	0,006	0	0	0	0	0	0	0,11	0,06	0		0	
9,25—9,50	0	0	0	0	0	0	0,003	0	0	10,11		0	
9,50—9,75	0,037	0	0	0	0	0	0	0	0	0		0	
9,75—10,00	0,03	0	0	0	0	0	0	0	0	0		0	
10,00—10,25	0,006	0	0	0	0	0	0	0	0	0		0	
10,25—10,50	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		0	
10,50—10,75	0,23	0	0	0	0	0	0	0,036	0	0		0,06	

Продолжение табл. 6.32

$\Delta E_{\gamma}, \text{МэВ}$	Ni	Cu	Zn ⁺	Y ⁺	Zr ⁺	Nb ⁺	Mo	Cd ⁺	In ⁺	Sn ⁺	Ba ⁺	Eu ⁺	Er ⁺
0,00—0,25	0,89	23,03	1,38	18,96	7,94	4,11	11,71	0	1,18	0,76	2,99	7,32	16,24
0,25—0,50	20,16	34,08	3,72	6,95	16,58	45,99	27,70	0,77	24,09	7,73	10,39	3,44	17,69
0,50—0,75	0,68	16,89	2,76	14,69	11,23	2,97	43,29	96,48	4,22	2,82	15,33	3,42	16,60
0,75—1,00	6,15	6,27	8,14	35,12	45,03	9,77	101,77	6,74	4,08	2,79	8,78	5,74	58,89
1,00—1,25	3,83	6,56	23,61	4,23	5,16	5,91	37,31	4,53	22,69	17,18	1,91	8,38	1,76
1,25—1,50	2,48	9,83	8,80	2,68	12,52	9,71	32,12	15,58	33,65	15,48	15,67	11,18	8,61
1,50—1,75	1,99	7,66	13,47	2,42	20,15	14,93	25,63	5,77	23,07	9,14	16,61	13,59	7,61
1,75—2,00	1,72	2,71	17,98	1,76	23,03	20,03	20,77	11,39	27,55	19,66	14,76	19,24	15,81
2,00—2,25	1,47	2,15	17,52	0	32,51	22,73	18,83	21,97	41,12	38,06	21,57	26,40	18,16
2,25—2,50	0,44	3,47	15,29	16,22	18,37	19,50	16,76	25,75	23,03	15,43	16,69	28,11	23,78
2,50—2,75	1,44	3,80	9,37	5,34	19,44	16,14	14,97	28,95	20,02	25,43	23,62	23,94	25,46
2,75—3,00	2,07	2,76	8,84	2,00	13,75	14,48	13,41	21,41	16,50	26,50	15,95	19,38	25,26
3,00—3,25	1,46	2,58	8,67	2,54	13,71	12,14	11,97	20,48	12,67	19,35	12,08	16,09	23,25
3,25—3,50	0,99	3,05	8,40	2,92	13,86	11,67	10,66	15,31	10,10	15,84	8,84	13,04	18,08
3,50—3,75	1,46	3,11	5,89	1,24	12,20	10,13	9,58	12,50	8,17	12,85	13,91	10,22	13,25
3,75—4,00	0,61	3,79	5,41	0,57	7,41	9,26	8,64	11,11	6,64	11,70	9,27	7,81	9,63
4,00—4,25	1,24	2,76	6,16	6,19	8,67	7,59	7,66	9,53	5,74	9,23	27,83	6,30	7,54
4,25—4,50	0,52	4,29	4,51	2,20	5,71	6,38	6,66	7,47	3,95	8,64	8,40	6,30	6,42
4,50—4,75	0,75	3,10	4,63	0,98	6,70	8,20	5,66	7,89	3,89	6,72	8,83	3,77	5,78
4,75—5,00	1,39	1,51	5,86	0,18	3,99	5,64	6,81	5,83	4,69	7,69	5,32	3,09	4,45
5,00—5,25	0,64	4,95	3,64	0,63	5,63	8,18	5,92	7,91	3,25	5,49	3,09	2,31	3,63
5,25—5,50	2,02	4,80	6,78	0	6,58	6,96	4,01	6,05	1,96	6,22	5,57	2,37	3,51
5,50—5,75	1,48	1,63	4,61	2,19	2,03	3,27	5,79	3,99	0,77	2,80	7,58	1,92	1,99
5,75—6,00	3,85	1,07	4,61	0,47	1,26	3,84	2,58	6,37	1,42	3,50	2,28	1,43	2,19
6,00—6,25	1,97	3,38	2,24	78,69	1,50	1,01	2,11	1,67	0,37	2,83	1,12	0,97	2,94
6,25—6,50	0,60	1,86	3,07	0	18,20	1,33	1,73	1,44	0,30	3,05	0,45	0,27	0,56
6,50—6,75	2,60	7,39	4,38	0,20	1,53	0,66	2,05	1,42	0,26	2,18	0,58	0,27	1,15
6,75—7,00	10,27	3,20	8,51	1,30	0,77	1,93	3,81	1,05	0,26	1,88	0,16	0,27	1,15
7,00—7,25	0,28	2,98	5,37	0	0	1,14	0,45	0,40	0,26	1,65	0,20	0,04	0,19
7,25—7,50	0,30	10,22	1,00	0,76	0,76	0	0,18	0,53	0,30	2,84	0,33	0,10	0,10
7,50—7,75	5,62	14,14	0,67	0,39	0,39	0	0,92	1,29	0,29	0,92	0,20	0,17	0,17
7,75—8,00	8,41	26,04	11,66	0,41	0,41	0	0,04	0,40	0,40	0,77	0	0	0,03
8,00—8,25	3,29	0	0,24	0	0	0	0	0,07	0,07	0,32	0	0	0,03

Продолжение табл. 6.32

$\Delta E_{\gamma}, \text{МэВ}$	Ni	Cu	Zn ⁺	Y ⁺	Zr ⁺	Nb ⁺	Mo	Cd ⁺	In ⁺	Sn ⁺	Ba ⁺	Eu ⁺	Er ⁺
8,25—8,50	0,005		0,81		0		0,57	0,62		0,24	0,11		
8,50—8,75	17,54		0,09		0,90			0,01		0,18	0		
8,75—9,00	37,91		0,16					0,11		0,36	0		
9,00—9,25	0		1,11					0,29		0	0,34		
9,25—9,50	0,035									0			
9,50—9,75	0									0,34			
9,75—10,00	0												
10,00—10,25	0												
10,25—10,50	0												
10,50—10,75	0,026												

$\Delta E_{\gamma}, \text{МэВ}$	Hf ⁺	Ta ⁺	W ⁺	Hg ⁺	Pb	Bi ⁺
0,00—0,25	55,51	0	59,15	0	0,04	0
0,25—0,50	15,40	42,01	8,08	81,64	0,71	0
0,50—0,75	1,78	1,01	6,37	6,84	0,78	0
0,75—1,00	14,92	2,11	6,27	3,38	0,21	0
1,00—1,25	47,97	5,03	2,93	3,45	0,18	0
1,25—1,50	40,78	9,47	4,20	7,74	0,36	0
1,50—1,75	38,62	18,95	8,37	27,77	0,57	0
1,75—2,00	27,44	24,96	12,10	7,44	0,61	0
2,00—2,25	25,58	26,06	20,22	20,12	0,08	0
2,25—2,50	22,51	23,82	18,80	14,16	0	0
2,50—2,75	18,14	19,60	16,10	12,15	0,16	0
2,75—3,00	14,90	17,13	12,92	11,68	0	0
3,00—3,25	11,39	13,09	10,56	10,12	0	0
3,25—3,50	8,95	10,77	9,12	10,36	0,06	0
3,50—3,75	7,93	9,20	8,24	4,16	0,03	0
3,75—4,00	6,20	7,91	6,04	4,16	0	0
4,00—4,25	4,56	6,92	6,26	3,96	0,28	0
4,25—4,50	5,05	5,76	4,54	4,00	0,15	0
4,50—4,75	2,28	4,05	7,26	14,13	0,79	111,70

ΔE_{γ} , МэВ	Hf ¹	Ta ¹	W ¹	Hg ¹	Pb	Bi ¹
4,75—5,00	3,03	3,66	1,24	14,17	0,73	
5,00—5,25	1,77	2,23	3,53	6,85	0,05	
5,25—5,50	2,74	1,27	8,98	5,85	0,36	
5,50—5,75	5,98	0,77	0,29	8,36	0	
5,75—6,00	1,17	1,94	0,74	15,76	0,17	
6,00—6,25	1,39	0,83	7,71	1,59	0	
6,25—6,50	0,80		1,26	8,22	0,57	
6,50—6,75	0,15		0,39	0,73	6,83	
6,75—7,00	0		0,32	0,68	0	
7,00—7,25	0		0,13	0,37	0	
7,25—7,50	0,15		1,06	0,26	90,10	

*¹ Данные работы [253].Групповые выходы γ -излучения при радиационном захвате в железе нейтронов различных энергий ΔE_n (фотонов в группе на 100 захватов) [254]

ΔE_{γ} , МэВ	ΔE_n , эВ								
	1,0—5 ¹ ÷ 4,14—1	4,14—1 ÷ 1,0+3	1,0+3 ÷ 1,4+3	1,4+3 ÷ 2,0+3	2,0+3 ÷ 3,0+3	3,0+3 ÷ 4,5+3	4,5+3 ÷ 5,0+3	5,0+3 ÷ 6,5+3	6,5+3 ÷ 9,0+3
1,0—1,5	7,0	7,0	6,9	6,7	6,6	5,7	4,9	4,0	3,2
1,5—2,0	14,8	14,6	7,9	13,6	12,7	11,0	9,1	6,7	4,5
2,0—2,5	6,0	6,1	7,5	6,3	7,5	6,7	7,0	7,4	7,7
2,5—3,0	9,4	9,3	11,8	9,0	9,6	7,9	7,1	6,1	5,3
3,0—3,5	11,3	11,2	12,1	10,9	11,6	9,7	8,8	7,8	6,8
3,5—4,0	3,2	3,2	4,6	3,5	4,3	4,5	5,2	6,1	7,0
4,0—4,5	9,2	9,1	7,8	8,8	8,8	7,9	7,2	6,4	5,6
4,5—5,0	4,4	4,4	6,1	4,6	5,1	4,9	5,2	5,5	5,8
5,0—5,5	1,2	1,2	2,2	1,4	2,0	1,8	2,1	2,5	2,8
5,5—6,0	9,3	9,3	3,9	3,9	8,1	8,2	7,6	6,8	6,2
6,0—6,5	9,4	9,3	15,2	9,1	9,0	7,5	6,6	5,4	4,3
6,5—7,0	0,2	0,3	0,2	0,4	0,6	1,0	1,4	1,9	2,4
7,0—7,5	4,8	4,7	0,8	4,4	3,9	3,8	3,4	2,8	2,2
7,5—8,0	50,5	50,0	54,1	46,0	42,0	32,8	23,5	12,3	1,8
8,0—8,5	0	0	0	0	0,01	0,02	0,03	0,04	0,06
8,5—9,0	0,6	0,8	0,02	1,6	2,1	4,3	6,2	8,4	10,6
9,0—9,5	3,6	4,5	0,09	8,7	11,8	24,0	34,7	47,8	59,7
9,5—10,0									

ΔE_{γ} , МэВ	ΔE_n , эВ								
	9,0+3 ÷ 1,0+4	1,0+4 ÷ 2,0+4	2,0+4 ÷ 2,3+4	2,3+4 ÷ 3,3+4	3,3+4 ÷ 4,9+4	4,9+4 ÷ 6,0+4	6,0+4 ÷ 2,0+5	2,0+5 ÷ 4,0+5	4,0+5 ÷ 1,0+6
1,0—1,5	8,8	6,6	7,2	7,4	7,5	7,6	7,9	8,2	8,7
1,5—2,0	8,7	10,5	15,1	14,5	10,2	10,6	12,4	13,3	13,9
2,0—2,5	13,1	12,1	6,2	6,4	12,3	14,2	13,2	14,1	15,3
2,5—3,0	10,2	12,2	9,1	9,7	14,7	15,6	13,6	13,8	14,6
3,0—3,5	11,6	14,5	11,6	11,6	17,5	19,0	15,7	15,8	16,9
3,5—4,0	12,5	8,0	1,9	2,1	6,6	7,5	8,9	9,5	10,1
4,0—4,5	13,1	10,9	8,8	8,5	8,9	9,5	10,1	8,4	10,2

Продолжение табл. 6.33

ΔE_{γ} , МэВ	ΔE_n , эВ								
	9,0+3 ÷ 1,0+4	1,0+4 ÷ 2,0+4	2,0+4 ÷ 2,3+4	2,3+4 ÷ 3,3+4	3,3+4 ÷ 4,9+4	4,9+4 ÷ 6,0+4	6,0+4 ÷ 2,0+5	2,0+5 ÷ 4,0+5	4,0+5 ÷ 1,0+6
4,5—5,0	10,3	7,8	5,0	5,2	8,1	7,6	9,2	12,3	10,3
5,0—5,5	6,0	4,5	1,2	1,3	4,3	5,9	4,7	5,2	10,2
5,5—6,0	7,1	5,9	9,4	8,8	3,9	3,7	3,9	6,3	3,6
6,0—6,5	5,0	8,9	9,6	10,7	12,9	11,2	8,2	9,1	6,4
6,5—7,0	2,9	1,2	0,2	0,1	0,2	1,0	6,6	5,6	8,9
7,0—7,5	3,4	2,1	4,9	4,4	0,9	0,7	3,4	2,2	4,4
7,5—8,0	3,9	28,6	51,8	53,9	46,1	41,2	36,5	34,8	4,4
8,0—8,5	2,0	0,1	0	0	0	0	0,6	0,4	28,3
8,5—9,0	7,2	3,3	0,4	0,01	0,03	0,5	0	0,3	0,5
9,0—9,5	40,5	18,9	2,4	0,08	0,2	2,7	5,4	0,6	0,3
9,5—10,0								5,0	5,4

*1 Читать как $1,0 \cdot 10^{-5}$.

Таблица 6.34

Групповые выходы γ -излучения при радиационном захвате в вольфраме нейтронов различных энергий ΔE_n (фотонов в группе на 100 захватов) [255]

ΔE_{γ} , МэВ	ΔE_n , эВ									
	Тепловые	0,4 ÷ 3,06	3,06 ÷ 3,93	3,93 ÷ 5,04	5,04 ÷ 6,48	6,48 ÷ 8,32	8,32 ÷ 10,7	10,7 ÷ 13,7	13,7 ÷ 17,6	17,6 ÷ 22,6
1,0—1,5	49,2	50,4	54,5	55,6	51,3	56,6	48,3	46,1	45,2	48,3
1,5—2,0	44,8	46,1	50,2	51,3	46,7	49,1	43,7	42,1	41,4	44,4
2,0—2,5	38,3	39,0	41,0	41,6	39,4	42,5	38,0	36,8	36,4	37,9
2,5—3,0	29,3	29,3	29,1	29,0	29,5	31,8	29,7	29,8	29,2	29,2
3,0—3,5	18,7	18,8	19,6	19,9	19,2	23,2	18,7	17,0	17,3	18,1
3,5—4,0	11,3	10,9	10,3	10,1	11,3	16,0	11,8	10,9	10,8	10,6
4,0—4,5	5,9	5,6	4,8	4,6	5,7	8,9	6,4	5,9	5,9	5,4
4,5—5,0	4,5	4,1	2,9	2,6	4,1	5,1	5,0	5,1	5,2	4,4
5,0—5,5	9,0	8,8	7,5	7,1	8,4	3,1	9,5	11,1	11,6	10,3
5,5—6,0	0,6	0,48	0,37	0,35	0,55	2,1	0,54	0,15	0,035	0,12
6,0—6,5	4,5	5,4	8,8	9,7	5,6	7,9	2,8	1,2	0,42	3,2
6,5—7,0	0,28	0,19	0,035	0,002	0,28	1,7	0,37	0,068	0,013	0,7—5
7,0—7,5	1,0	0,65	0,128	0,006	1,08	7,2	1,5	0,024	0,046	0,27—4
7,5—8,0										
8,0—8,5										

Продолжение табл. 6.34

ΔE_{γ} , МэВ	ΔE_n , эВ										
	22,6 ÷ 29,0	29,0 ÷ 37,3	37,3 ÷ 47,9	47,9 ÷ 61,4	61,4 ÷ 78,9	78,9 ÷ 101,3	101,3 ÷ 130,1	130,1 ÷ 167,0	167,0 ÷ 214,5	214,5 ÷ 275,4	275,4 ÷ 353,6
1,0—1,5	56,5	51,4	56,6	48,7	54,8	54,9	55,6	53,9	53,5	50,9	54,0
1,5—2,0	49,0	45,9	49,2	47,3	44,1	45,5	49,7	43,7	48,3	45,7	46,0
2,0—2,5	42,4	39,6	42,5	38,1	40,9	41,0	41,6	41,1	41,2	39,2	41,0
2,5—3,0	31,7	30,4	31,8	31,2	32,2	31,7	30,0	32,4	31,1	29,7	31,6
3,0—3,5	23,1	20,3	23,4	24,2	25,6	24,4	21,3	26,7	20,6	19,7	23,2
3,5—4,0	15,8	13,2	16,3	19,0	19,2	17,4	12,4	20,3	12,3	12,0	15,9
4,0—4,5	8,8	7,3	9,2	13,7	12,2	10,8	6,5	13,4	7,0	6,4	9,7
4,5—5,0	5,1	5,0	5,4	10,9	7,7	6,7	3,9	8,6	4,5	4,6	6,2
5,0—5,5	3,2	7,2	3,0	7,3	4,8	5,0	6,2	5,5	4,3	8,7	4,7
5,5—6,0	2,1	1,3	2,5	8,6	3,0	2,7	1,3	3,6	4,0	6,6	3,4
6,0—6,5	7,8	4,7	7,9	4,0	4,9	5,2	8,1	4,6	0,98	4,8	2,9
6,5—7,0	1,7	0,82	1,7	0,1	1,2	0,98	0,3	0,78	0,26	0,21	0,73
7,0—7,5	7,0	3,3	7,1	0,55	3,4	2,7	0,83	1,9	0,71	0,57	1,98
7,5—8,0											
8,0—8,5											

*1 Читать как $1234,0 \div 1,11 \cdot 10^5$.

Таблица 6.35

Групповые выходы γ -излучения при радиационном захвате
в ^{238}U нейтронов различных энергий ΔE_n
(фотонов в группе на 100 захватов) [256]

ΔE_γ , МэВ	ΔE_n , эВ							
	Тепловыс	0,4 ÷ 3,06	3,06 ÷ 3,93	3,93 ÷ 5,04	5,04 ÷ 6,48	6,48 ÷ 8,32	8,32 ÷ 10,7	10,7 ÷ 13,7
1,0—1,25	29,9	30,5	31,1	31,9	33,6	33,9	33,0	31,9
1,25—1,5	25,5	26,3	27,2	28,3	30,8	31,2	29,3	28,3
1,5—1,75	25,7	26,2	26,7	27,3	28,8	29,0	27,8	27,3
1,75—2,0	25,4	25,9	26,4	27,1	28,6	28,8	27,6	27,1
2,0—2,25	21,3	21,8	22,3	22,9	24,3	24,5	23,4	22,9
2,25—2,5	17,2	17,5	17,9	18,4	19,6	19,8	18,8	18,4
2,5—2,75	13,8	14,1	14,4	14,8	15,7	15,9	15,1	14,8
2,75—3,0	10,6	10,5	10,4	10,2	10,0	9,9	10,1	10,2
3,0—3,25	5,4	5,2	5,0	4,7	4,2	4,1	4,5	4,7
3,25—3,5	3,5	3,4	3,2	2,9	2,3	2,2	2,8	3,1
3,5—3,75	5,3	5,0	4,7	4,3	3,3	3,2	4,4	4,3
3,75—4,0	3,9	4,0	4,3	4,6	5,6	5,7	4,7	4,0
4,0—4,25	10,8	9,7	8,3	6,6	2,7	2,0	4,9	7,0
4,25—4,5	0,024	0,024	0,025	0,025	0,027	0,02	0,026	0,025
4,5—4,75	0,43	0,44	0,45	0,45	0,44	0,44	0,41	0,5
4,75—5,0								
5,0—5,25								
5,25—5,5								
5,5—5,75								
5,75—6,0								

ΔE_γ , МэВ	ΔE_n , эВ								
	13,7 ÷ 17,6	17,6 ÷ 22,6	22,6 ÷ 29,0	29,0 ÷ 37,3	37,3 ÷ 47,8	47,8 ÷ 61,4	61,4 ÷ 78,9	78,9 ÷ 101,3	101,3 ÷ 130,1
1,0—1,25	32,7	33,8	33,8	36,0	35,9	35,0	35,8	35,1	34,8
1,25—1,5	29,6	31,5	31,1	32,7	32,6	31,6	32,3	31,8	32,7
1,5—1,75	28,0	29,0	28,8	30,0	29,8	29,1	29,4	29,2	30,1
1,75—2,0	27,7	28,8	28,7	30,0	29,7	28,9	29,2	29,1	30,0
2,0—2,25	23,5	24,6	24,4	25,4	25,4	24,7	24,9	24,8	25,6
2,25—2,5	18,9	19,8	19,6	20,4	20,4	19,8	20,0	20,0	20,5
2,5—2,75	15,2	15,9	15,8	16,4	16,4	15,9	16,1	16,0	16,5
2,75—3,0	10,0	9,7	9,9	9,9	9,9	9,9	9,7	9,8	10,0
3,0—3,25	4,5	4,0	4,2	4,1	4,1	4,2	4,0	4,0	4,1
3,25—3,5	3,0	2,8	2,8	2,7	2,7	3,1	3,3	2,6	2,7
3,5—3,75	3,7	2,7	3,3	4,0	4,0	4,2	4,2	3,9	2,6
3,75—4,0	3,8	3,9	3,5	2,1	2,2	2,5	2,2	2,7	2,2
4,0—4,25	5,7	3,5	3,8	1,2	1,3	3,1	2,3	2,9	2,5

Продолжение табл. 6.35

ΔE_γ , МэВ	ΔE_n , эВ								
	13,7 ÷ 17,6	17,6 ÷ 22,6	22,6 ÷ 29,0	29,0 ÷ 37,3	37,3 ÷ 47,8	47,8 ÷ 61,4	61,4 ÷ 78,9	78,9 ÷ 101,3	101,3 ÷ 130,1
4,25—4,5	0,026	0,026	0,026	0,027	0,027	0,026	0,026	0,026	0,027
4,5—4,75	0,57	0,63	0,65	0,83	0,82	0,55	0,39	0,74	0,55
4,75—5,0									
5,0—5,25									
5,25—5,5									
5,5—5,75									
5,75—6,0									

ΔE_γ , МэВ	ΔE_n , эВ								
	130,1 ÷ 3,90 + 3 ¹	3,90 + 3 ÷ 5,25 + 4	5,25 + 4 ÷ 1,11 + 5	1,11 + 5 ÷ 3,02 + 5	3,02 + 5 ÷ 4,98 + 5	4,98 + 5 ÷ 6,72 + 5	6,72 + 5 ÷ 9,07 + 5	9,07 + 5 ÷ 1,1 + 6	
1,0—1,25	34,5	39,4	39,1	38,1	37,9	38,1	38,2	38,4	
1,25—1,5	31,6	35,9	35,9	35,4	35,6	36,1	36,5	36,9	
1,5—1,75	29,5	31,2	30,8	30,4	30,8	31,5	32,2	33,0	
1,75—2,0	29,5	29,5	29,3	29,3	29,9	30,6	31,4	32,1	
2,0—2,25	24,9	23,1	22,9	23,3	23,9	24,6	25,3	26,0	
2,25—2,5	20,2	18,5	18,3	18,7	19,1	19,7	20,3	21,1	
2,5—2,75	16,3	14,8	14,6	14,8	15,1	15,5	16,1	16,7	
2,75—3,0	10,4	11,0	10,8	11,7	11,9	12,1	12,5	13,0	
3,0—3,25	4,4	3,9	4,9	6,9	9,4	9,4	9,7	10,0	
3,25—3,5	2,4	2,4	3,0	4,5	4,8	7,6	7,5	7,6	
3,5—3,75	3,5	2,8	3,4	2,9	4,6	2,9	5,6	5,9	
3,75—4,0	3,2	2,1	1,9	3,1	2,3	3,5	2,9	3,8	
4,0—4,25	2,2	2,8	2,4	2,0	2,2	2,2	1,9	2,2	
4,25—4,5	0,029	0,021	0,027	1,1	1,5	1,3	2,2	1,6	
4,5—4,75	0,49	1,8	1,5	0,01	0,2	1,3	0,69	1,6	
4,75—5,0			0,38	1,0	0,035	0,022	0,87	0,77	
5,0—5,25				0,25	0,89	0,17	0,012	0,45	
5,25—5,5						0,53	0,42	0	
5,5—5,75							0,13	0,33	
5,75—6,0								0,1	

¹ Читать как 130,1 ÷ 3,90 · 10³.

Средние сечения образования вторичного γ -излучения при взаимодействии быстрых нейтронов реактора с некоторыми элементами; значения $4\pi \frac{d\sigma}{d\Omega}$

ΔE_γ , МэВ	Na	Al	Si	S	K
1,0—1,5	59* ²	181	61* ²	73* ²	133* ²
1,5—2,0	109	36	287	37	80
2,0—2,5	47	103	30	199	39
2,5—3,0	50	26	11,1	16,4	96
3,0—3,5	21,6	42	5,4	11,2	26
3,5—4,0	14,8	8,8	5,4	3,3	23
4,0—4,5	7,3	5,8	1,2	10,8	6,1
4,5—5,0	4,6	6,9	3,2	3,8	8,7
5,0—5,5	2,9	4,9	1,2	1,2	3,6
5,5—6,0	3,7	2,0	1,5	<3,0	4,6
6,0—6,5	4,2	<1,7	<1,5	<0,7	<3,1
6,5—7,0	2,4	<1,5	<0,7	<1,2	<1,4
7,0—7,5		<0,3	<2,6	<0,6	<1,5

*¹ Для энергии фотонов вторичного излучения, равной 0,845 МэВ.

*² $\Delta E_\gamma = 1,1 \div 1,5$ МэВ.

*³ $\Delta E_\gamma = 0,99 \div 1,5$ МэВ.

*⁴ $\Delta E_\gamma = 0,98 \div 1,5$ МэВ.

Сечения радиационного захвата приведены в § 6.1. Большая информация о спектрах захватного γ -излучения имеется в работах [244—253].

В табл. 6.32 представлены спектры фотонов, сопутствующих радиационному захвату тепловых нейтронов в основных материалах, представляющих интерес для физики защиты, реакторостроения и других областей прикладной ядерной физики. Спектры приведены в групповом представлении с шириной группы $\Delta E_\gamma = 0,25$ МэВ. Таблица составлена по оценкам И. Н. Качанова [139], для ряда элементов приведены данные работы [253]. Заметим, что данные табл. 6.32 не содержат γ -излучение распада радиоактивных конечных ядер. Эти данные могут быть добавлены к соответствующим группам. В табл. 6.33—6.35 приведены групповые спектры γ -излучения радиационного захвата в Fe, W, ²³⁸U нейтронов различных энергетических групп ΔE_n при изменении энергии нейтронов в широком интервале энергий.

В табл. 6.36 приведены средние сечения образования вторичного γ -излучения для быстрых нейтронов реактора.

Задача определения поля вторичного γ -излучения в среде сводится к интегрированию вкладов в поле излучения в данной точке детектирования, обусловленных вторичными фотонами, образующимися в актах взаимодействия с нейтронами во всем объеме защиты. Решение таких задач приводится, например, в работах [69, 72, 139, 161, 258].

На рис. 6.25—6.27 приведены пространственные зависимости отношения мощности максимальной эквивалентной дозы вторичного γ -излучения к мощности максимальной эквивалентной дозы нейтронов для ряда сред и источников нейтронов реактора и конвертора промежуточных нейтронов; подобная информация для моноэнергетических источников показана на рис. 6.28; на рис. 6.9 приведены пространственные

быстрых нейтронов реактора с некоторыми элементами; (ΔE_γ , 90°), 10^{-27} см² [мб] [257]

Ca	Ti	Fe* ¹	Ni	Cu	Zn	Ba
64* ²	688* ³	278	795	1090* ⁴	909	1345
36,5	116	110	149	256	195	460
18	97	101	68	127	113	290
16,5	48	74	42,5	87	59	144
8,0	22	44	37,5	45	41	<79
40,5	20	33	17,3	35	27	<47
2,5	9,5	8,7	11,5	24	16	<22
1,9	5,1	5,6	4,8	13,5	<13,3	<21
1,6	<4,4	3,8	<4,7	9,1	<6,4	<9,2
<3,0	<2,8	2,4	<3,4	<5,9	<5,6	<8,3
<1,4	<2,4	<2,1		<6,2		<5,2
{ <1,1		<0,6	{ <5,3			<2,4
		<1,5				

$\sigma \approx 6 \cdot 10^{-25}$ см² [600 мб].

распределения в бетоне дозы, обусловленной вторичным γ -излучением и нейтронами источника деления, а также моноэнергетического источника нейтронов с энергией $\Delta E_0 = 12,2 \div 15$ МэВ.

В заключение отметим некоторые важные закономерности формирования вторичного γ -излучения в средах [9, 139].

1. В легких средах отношение $\dot{H}_{\text{макс},\gamma} / \dot{H}_{\text{макс},\text{л}}$ растет с ростом толщины среды d , проходит при некотором d_0 через 1 и с дальнейшим ростом d становится больше 1. Величина d_0 для нейтронов спектра деления при измерении дозовых характеристик равняется 36 см для воды, 50 см для водорода, 67 см для гидрида лития, 54 см для борированной воды с массовой долей бора 1 %.

2. Для тяжелых веществ $\dot{H}_{\text{макс},\gamma} / \dot{H}_{\text{макс},\text{л}}$ с толщиной защиты d изменяется слабо (значительно слабее, чем в легких средах).

3. Отношение $\dot{H}_{\text{макс},\gamma} / \dot{H}_{\text{макс},\text{л}}$ как функция толщины защиты практически не зависит от углового распределения нейтронов на входе в защиту для широкого класса азимутально-симметричных угловых распределений излучения источников нейтронов [260].

4. γ -Излучение, сопровождающее неупругое рассеяние нейтронов на ядрах, обычно вносит значительный вклад в характеристики поля вторичного γ -излучения, когда на входе в среду имеется жесткий спектр нейтронов.

5. Задание спектра γ -излучения, генерируемого при радиационном захвате, не зависящим от энергии захватываемых нейтронов, может приводить к погрешностям зависимости $\dot{H}_{\text{макс},\gamma} / \dot{H}_{\text{макс},\text{л}}$ от d до 30—40 % [260].

6. К существенным погрешностям расчетов может приводить учет вклада в поле вторичного γ -излучения различных изотопов при-

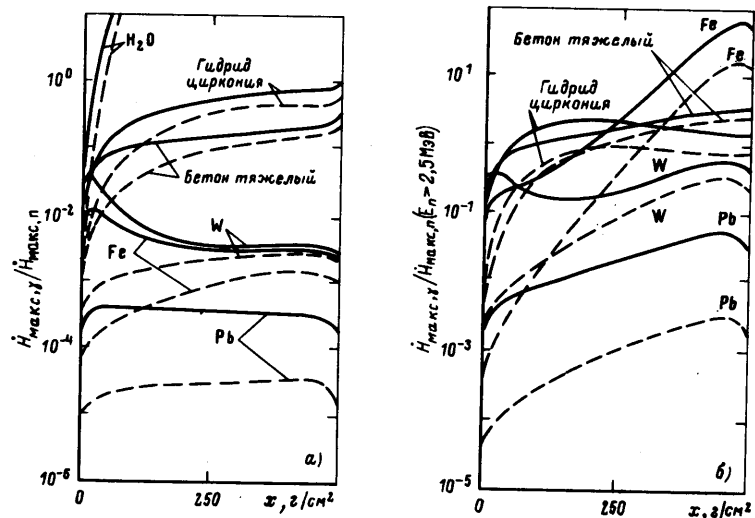


Рис. 6.25. Отношение полной мощности максимальной эквивалентной дозы вторичного γ -излучения $\dot{H}_{\text{макс},\gamma}$ к полной мощности максимальной эквивалентной дозы нейтронов $\dot{H}_{\text{макс},\text{л}}$ (а) или к мощности максимальной эквивалентной дозы нейтронов с энергией $E > 2,5$ МэВ (б) по глубине x барьеров из различных материалов для нейтронов источника спектра деления (---) и спектра деления при $E \geq 2,5$ МэВ и спектра $1/E$ при $E < 2,5$ МэВ (—) [139]

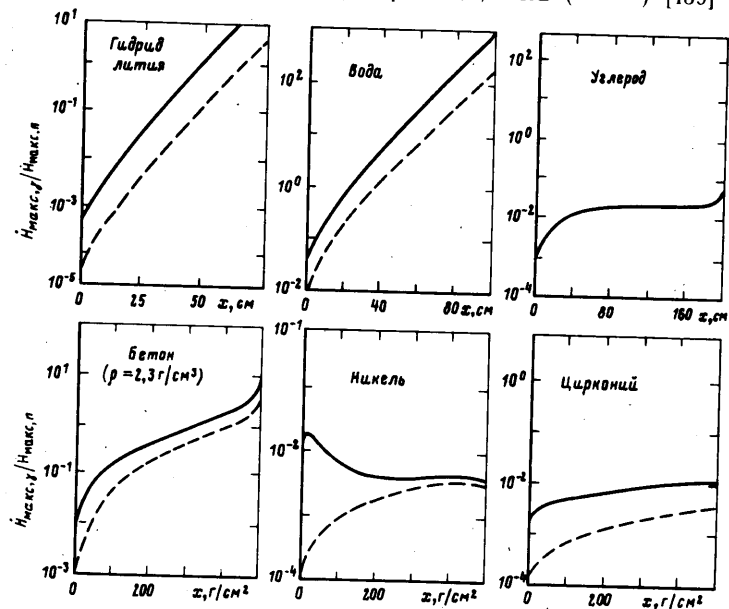


Рис. 6.26. Отношение полной мощности максимальной эквивалентной дозы вторичного γ -излучения $\dot{H}_{\text{макс},\gamma}$ к полной мощности максимальной эквивалентной дозы нейтронов $\dot{H}_{\text{макс},\text{л}}$ по глубине x барьеров из различных материалов для нейтронов источника спектра деления (---) и спектра деления при $E \geq 2,5$ МэВ и спектра $1/E$ при $E < 2,5$ МэВ (—) [139]

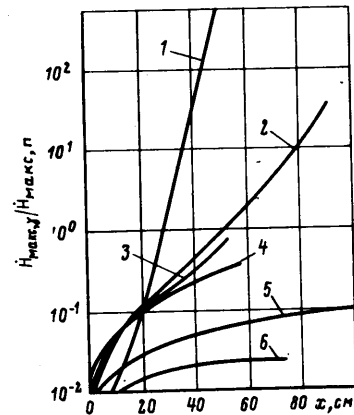


Рис. 6.27. Отношение полной мощности максимальной эквивалентной дозы вторичного γ -излучения $\dot{H}_{\text{макс},\gamma}$ к полной мощности максимальной эквивалентной дозы нейтронов $\dot{H}_{\text{макс},\text{л}}$ по глубине x барьеров из различных материалов для источника конвертора промежуточных нейтронов КРН [259]:

1 — вода; 2 — серпентинитовая руда; 3 — бетон; 4 — карбид бора; 5 — окись закись железа; 6 — сталь

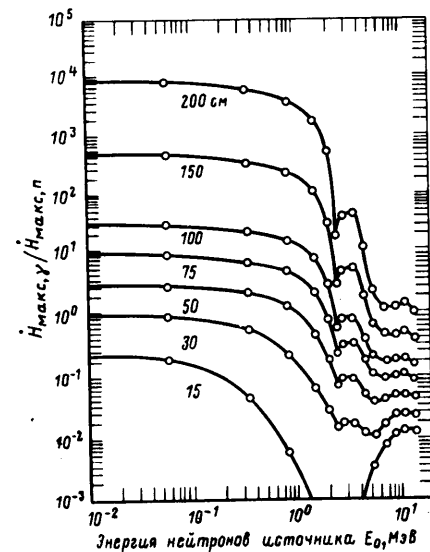


Рис. 6.28. Отношение полной мощности максимальной эквивалентной дозы вторичного γ -излучения $\dot{H}_{\text{макс},\gamma}$ к полной мощности максимальной эквивалентной дозы нейтронов $\dot{H}_{\text{макс},\text{л}}$ в барьерах из обычного бетона ($\rho = 2,3$ г/см³, состав см. в колонке 2 табл. 6.12) в зависимости от энергии нейтронов плоского мононаправленного источника при почти нормальном падении ($\cos\theta_0 = 0,9894$) [138]

месяц с большими сечениями захвата, особенно для материалов, имеющих, подобно свинцу, небольшие сечения радиационного захвата.

7. Наилучшими с точки зрения минимума выхода вторичного γ -излучения являются среды, состоящие из смеси легких и тяжелых веществ.

8. Для снижения выхода захватного γ -излучения можно использовать гомогенное или гетерогенное борирование среды.

Глава 7 ЗАЩИТА ОТ α -И β -ИЗЛУЧЕНИЙ

§ 7.1. ПРОБЕГИ α -ЧАСТИЦ В ВЕЩЕСТВЕ

Корпускулярные α -частицы имеют небольшие пробеги в веществе, поэтому защита от внешних потоков этого вида излучения не представ-

Таблица 7.1

Пробегι α-частиц R в мг/см² и МКМ или см [262, 263]

E ₀ , МэВ	Алюминий (ρ=2,7 г/см³)		Биологическая ткань (ρ=1 г/см³)*1		Вода (ρ=1 г/см³)		Воздух (ρ=0,001293 г/см³)		Мель (ρ=8,93 г/см³)		Свинец (ρ=11,34 г/см³)		Углерод (ρ=2,25 г/см³)	
	МГ/СМ²	МКМ	МГ/СМ²	МКМ	МГ/СМ²	МКМ	МГ/СМ²	СМ	МГ/СМ²	МКМ	МГ/СМ²	МКМ	МГ/СМ²	МКМ
0,1	0,256	0,950	0,103	1,03	0,100	1,00	0,146	0,113	0,486	0,544	0,959	0,845	0,139	0,617
0,2	0,398	1,47	0,161	1,61	0,157	1,57	0,228	0,176	0,754	0,844	1,49	1,31	0,216	0,960
0,3	0,509	1,88	0,209	2,09	0,204	2,04	0,292	0,226	0,962	1,08	1,89	1,67	0,277	1,23
0,4	0,604	2,24	0,253	2,53	0,246	2,46	0,348	0,269	1,14	1,28	2,23	1,96	0,331	1,47
0,5	0,692	2,56	0,294	2,94	0,287	2,87	0,400	0,309	1,30	1,46	2,52	2,23	0,381	1,69
0,6	0,775	2,87	0,335	3,35	0,328	3,28	0,449	0,347	1,45	1,62	2,80	2,47	0,429	1,91
0,7	0,855	3,17	0,377	3,77	0,369	3,69	0,498	0,385	1,60	1,79	3,06	2,70	0,476	2,12
0,8	0,935	3,46	0,419	4,19	0,411	4,11	0,547	0,423	1,74	1,95	3,31	2,92	0,524	2,33
0,9	1,02	3,76	0,463	4,63	0,454	4,54	0,596	0,461	1,88	2,11	3,55	3,13	0,572	2,54
1,0	1,09	4,05	0,506	5,06	0,496	4,96	0,645	0,499	2,02	2,26	3,78	3,34	0,621	2,76
1,5	1,52	5,63	0,750	7,50	0,738	7,38	0,923	0,714	2,76	3,09	5,00	4,41	0,892	3,96
2,0	1,99	7,38	1,04	10,4	1,02	10,2	1,25	0,966	3,53	3,96	6,36	5,61	1,21	5,37
2,5	2,52	9,32	1,36	13,6	1,34	13,4	1,62	1,25	4,36	4,88	7,87	6,94	1,57	6,98
3,0	3,10	11,5	1,74	17,4	1,71	17,1	2,05	1,58	5,25	5,88	9,52	8,39	1,98	8,82
3,5	3,74	13,9	2,16	21,6	2,13	21,3	2,53	1,96	6,22	6,96	11,3	9,98	2,45	11,0
4,0	4,45	16,5	2,62	26,2	2,58	25,8	3,06	2,37	7,26	8,13	13,2	11,7	2,97	13,2
4,5	5,20	19,2	3,12	31,2	3,08	30,8	3,64	2,82	8,35	9,35	15,2	13,4	3,52	15,7
5,0	6,00	22,2	3,67	36,7	3,62	36,2	4,26	3,29	9,51	10,6	17,4	15,3	4,13	18,4
5,5	6,87	25,4	4,26	42,6	4,20	42,0	4,94	3,82	10,8	12,0	19,6	17,3	4,78	21,2
6,0	7,78	28,8	4,88	48,8	4,82	48,2	5,65	4,36	12,0	13,5	22,0	19,4	5,47	24,3
6,5	8,75	32,4	5,55	55,5	5,47	54,7	6,41	4,96	13,4	15,0	24,5	21,6	6,21	27,6
7,0	9,76	36,2	6,24	62,4	6,17	61,7	7,21	5,58	14,8	16,6	27,0	23,8	6,99	31,0
7,5	10,8	40,1	6,99	69,9	6,90	69,0	8,06	6,23	16,3	18,3	29,7	26,2	7,81	34,7
8,0	11,7	43,4	7,80	78,0	7,68	76,8	9,30	7,19	18,7	20,9	35,7	31,5	8,79	39,1
9,0	14,1	52,2	9,44	94,4	9,30	93,0	11,2	8,66	21,9	24,5	41,9	37,0	10,6	47,2
10,0	16,6	61,6	11,2	112	11,1	111	13,2	10,2	25,3	28,3	48,4	42,7	12,6	56,1

*1 Состав биологической ткани в массовых долях: Н — 0,1; С — 0,11; О — 0,75; С — 0,11; N — 0,026; Са — 0,000031; 0,0018; S — 0,0024; К — 0,003; Na — 0,0016; Cl — 0,0018; Mg — 0,0019; P — 0,011.

ляет больших трудностей. Для решения этих задач обычно достаточно знать пробег частицы в веществе.

Не менее важной проблемой является защита внешней среды от загрязнений радиоактивными веществами при работе с открытыми источниками [10], цель которой — предотвращение попадания радиоактивных веществ внутрь организма и внутреннего облучения. Значительную роль в решении этой задачи играют средства индивидуальной защиты (СИЗ) органов дыхания, пищеварения и кожных покровов человека [261]. СИЗ обычно применяют, когда безопасность работы не может быть обеспечена конструкцией оборудования, организацией производственных процессов, средствами коллективной защиты. Вопросы защиты внешней среды от радиоактивных веществ в настоящем справочнике не рассматриваются.

В табл. 7.1. приводятся пробегι α-частиц для наиболее важных веществ. Данные для элементов при энергии E₀ ≤ 7,5 МэВ приводятся по [262], для 8,0 МэВ ≤ E₀ ≤ 10 МэВ — по [263].

Для многокомпонентных сред расчет пробегов R проведен по рекомендации [264]:

$$1/R = \sum_{i=1}^m f_i/R_i, \quad (7.1)$$

где R_i — пробег α-частицы в веществе i-й компоненты, г/см², с массовым содержанием f_i; $\sum_{i=1}^m f_i = 1$; значения R_i выбраны из [262, 263].

Расчеты R для биологической ткани проведены для плотности ρ = 1 г/см³. Для других тканей [265], плотности которых отличны от ρ = 1 г/см³, расчет R можно выполнить по формуле (7.1) или с пересчетом по плотности для сходного состава ткани.

Подробная информация о пробегах протонов, дейтронов, тритонов, ионов гелия и α-частиц для всех элементов приводится в [262, 263].

Данные табл. 7.1 и [262, 263] позволяют оценивать энергетические потери в слое толщиной d. Для начальной энергии α-частиц E₀ пробег R₀ на толщину слоя, определим пробег R₁ = R₀ - d и соответствующую ему энергию E₁. Потеря энергии в слое толщиной d равна ΔE = E₀ - E₁.

Пробег в воздухе R_в, см, для α-частиц, испускаемых естественными α-излучающими нуклидами (E₀ = 4 ÷ 7 МэВ), можно рассчитать по следующему соотношению [266]:

$$R_{в} = 0,318E_0^{3/2}, \quad (7.2)$$

где E₀ — энергия α-частиц, МэВ.

Для других сред, отличных от воздуха, пробег α-частиц R_x, см, для сред с атомной массой A_x и плотностью ρ_x для E₀ = 4 ÷ 7 МэВ можно рассчитать по формулам

$$R_x = \frac{1,78 \cdot 10^{-4}}{\rho_x} \sqrt[3]{A_x^2 E_0^3} \quad (7.3)$$

или

$$R_x = \frac{10^{-4} \sqrt{A_x E_0^3}}{\rho_x}, \quad (7.4)$$

где E₀ выражена в МэВ; ρ_x — в г/см³.

Из формул (7.2)—(7.4) и пробегов α -частиц, приведенных в табл. 7.1, видно, что проникающая способность α -частиц невелика. Тем не менее при энергии $E_0 > 7,5$ МэВ пробег α -частиц в биологической ткани может превосходить толщину слоя эпидермиса кожи (70 мкм) и облучать чувствительные клетки базального слоя.

Для защиты организма от внешних потоков α -частиц достаточно тонких защитных экранов. Слой воздуха около 5,6 см полностью поглощает α -частицы с энергией 7 МэВ. Для защиты рук от внешнего потока α -частиц с запасом достаточно хирургических перчаток.

§ 7.2. ЗАЩИТА ОТ ЭЛЕКТРОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Электронное излучение — корпускулярное излучение, состоящее из электронов и (или) позитронов.

Защита собственно от электронов, позитронов и β -частиц не представляет большого труда в связи с их небольшими пробегами в среде. Основная задача защиты от мощных пучков электронов и β -частиц сводится к защите от вторичного тормозного излучения и (или) третичного фотонейтронного излучения, если энергия тормозного излучения превышает порог реакции (γ , n).

ЗАЩИТА ОТ ЭЛЕКТРОНОВ И β -ЧАСТИЦ

Проникающая способность электронов или β -частиц определяется пробегом. Различают три вида пробегов электронов в веществе [267]: средний \bar{R} , максимальный $R_{\text{макс}}$ и экстраполированный (или практический) $R_{\text{экс}}$ (рис. 7.1). *Максимальный пробег моноэнергетических электронов* — минимальная толщина слоя вещества, при которой ни один из электронов, падающих нормально на слой, из него не вылетает. Однозначное экспериментальное определение $R_{\text{макс}}$ не представляется возможным, поэтому на практике экстраполируют линейную часть кривой поглощения (кривая 1 на рис. 7.1) к оси абсцисс. Пересечение экстраполированного линейного участка кривой (штриховая линия на рис. 7.1) с осью абсцисс отмечает на этой оси *экстраполированный (практический) пробег моноэнергетических электронов в веществе* $R_{\text{экс}}$.

Средний пробег (или просто пробег) электронов в веществе определяется обычно в модели непрерывного замедления по формуле

$$\bar{R}(E_0) = \int_0^{E_0} \frac{dE}{(dE/dx)}, \quad (7.5)$$

где dE/dx — полные потери энергии электрона.

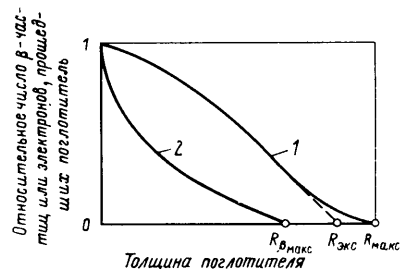


Рис. 7.1. Кривые поглощения моноэнергетических электронов (1) и β -частиц (2) в среде

Заметим, что средний пробег в средах с большими Z не достаточно полно отражает физику процессов переноса электронов.

Для β -частиц кривая поглощения (кривая 2 на рис. 7.1) имеет форму, близкую к экспоненциальной, асимптотически приближается к оси абсцисс и пересекает ее при некоторой толщине $R_{\beta, \text{макс}}$, называемой *максимальным пробегом β -частиц с граничной энергией E_{β}* .

Для среды толщиной меньше максимального пробега ослабление плотности потока β -частиц приближенно следует экспоненциальному закону

$$\varphi = \varphi_0 \exp(-\mu_m d), \quad (7.6)$$

где d — толщина поглотителя, г/см²; μ_m — массовый коэффициент поглощения электронов, см²/г (значения μ_m в алюминии для спектров β -частиц широко используемых нуклидов приведены в табл. 7.2 [268]). Зависимость μ_m , см²/г, от максимальной энергии β -частиц E_{β} , МэВ, можно приближенно аппроксимировать формулой [268]

$$\mu_m \approx 15,5 E_{\beta}^{-1,41} \approx 17 E_{\beta}^{-1,43} \approx 22 E_{\beta}^{-1,33} \quad (7.7)$$

Приведем полезные рекомендации и формулы для расчетов пробегов.

1. Максимальный пробег моноэнергетических электронов или β -частиц можно принять равным увеличенному на 30% экстраполированному пробегу моноэнергетических электронов или электронов с максимальной энергией в спектре β -частиц соответственно. Такое значение даст верхнюю оценку максимального пробега.

2. Экстраполированный пробег $R_{\text{экс}}$, г/см², моноэнергетических электронов в диапазоне энергий от 0,3 кэВ до 30 МэВ для материалов с атомными номерами от 5,3 (эффektivный атомный номер для полиэтилена) до 82 при нормальном падении может быть определен по формуле [269]

$$R_{\text{экс}} = a_1 \left[\frac{1}{a_2} \ln(1 + a_2 \alpha_0) - \frac{a_3 \alpha_0}{(1 + a_4 \alpha_0^{a_5})} \right], \quad (7.8)$$

где $\alpha_0 = E_0/m_0c^2$ (E_0 — энергия электрона, МэВ; m_0c^2 — энергия покоя электрона; $m_0c^2 = 0,511$ МэВ); $a_1 = \frac{0,2335A}{Z^{1,209}}$; $a_2 = 1,78 \cdot 10^{-4} Z$; $a_3 =$

Таблица 7.2

Экспериментальные значения μ_m , см²/г, в алюминии для спектров β -частиц нуклидов [268]

Нуклид	μ_m	Нуклид	μ_m	Нуклид	μ_m	Нуклид	μ_m
²⁴ Na	8,1	⁵⁹ Fe	43	⁹⁹ Mo	11,7	¹⁵² Eu	26
²⁷ Mg	6,1	⁶⁰ Co	79	¹⁰³ Ru	161	¹⁶⁵ Dy	12,4
²⁸ Al	2,5	⁶⁴ Cu	33	¹⁰⁵ Ru	11	¹⁷⁰ Tm	17,3
³¹ Si	8	⁶⁵ Zn	107	¹¹⁰ Ag	2,9	¹⁸⁵ W	70
³² P	5,3	⁸² Br	35	¹¹⁴ In	6,35	¹⁹² Ir	33,5
³⁵ S	290	⁸⁹ Sr	8,8	¹²⁴ Sb	14	¹⁹⁸ Au	19,3
⁴² K	2,56	⁹⁰ Y	4,7	¹³⁴ Cs	23	²⁰³ Hg	77
⁴⁵ Ca	128	⁹⁵ Zr	60	¹⁴⁰ La	9,6	²⁰⁴ Tl	25,6
⁵⁶ Mn	4,85						

$$= 0,9891 - 3,01 \cdot 10^{-4} Z; a_4 = 1,468 - 1,180 \cdot 10^{-2} Z; a_5 = \frac{1,232}{Z^{0,109}} \quad (A - \text{атомная масса, } Z - \text{атомный номер}).$$

Максимальная погрешность аппроксимирующего соотношения (7.8) для $E_0 > 1$ МэВ 4,5 %, для $E_0 < 1$ МэВ 8,4 %.

3. Экстраполированный пробег моноэнергетических электронов в г/см^2 в диапазоне энергий 30 кэВ — 3 МэВ при углах падения $0^\circ \leq \theta_0 \leq 60^\circ$ на материалы с эффективным атомным номером $Z = 6 \div 74$ можно определить с погрешностью не выше 10 % по эмпирической формуле [267]

$$R_{\text{экс}} = \frac{0,161 \cos \frac{\theta_0}{2}}{Z^{0,2}} \left(\sqrt{1 + 25E_0^2} - 0,9865 \right), \quad (7.9)$$

где E_0 — энергия электронов, МэВ.

4. Для идентификации энергии электронов часто по измеренному экстраполированному пробегу требуется определить энергию электронов.

Энергия электрона E_0 , МэВ, соответствующая экстраполированному пробегу $R_{\text{экс}}$, в диапазоне изменения указанных в п. 2 параметров можно рассчитать по формуле [269]

$$E_0 = C_1 m_0 c^2 \left\{ \exp \left[R_{\text{экс}} \left(C_2 + \frac{C_3}{1 + C_4 R_{\text{экс}}^{C_5}} \right) / C_1 \right] - 1 \right\}, \quad (7.10)$$

$$\text{где } C_1 = \frac{2,98 \cdot 10^3}{Z}; C_2 = \frac{6,14 Z^{1,026}}{A};$$

$$C_3 = 2,57 \cdot 10^2 - 0,34Z; C_4 = \frac{1,47 \cdot 10^3}{Z^{0,692}}; C_5 = \frac{0,905}{Z^{0,1874}};$$

$R_{\text{экс}}$ выражено в г/см^2 .

Соотношения (7.8) и (7.10) могут быть применены для многослойных экранов с заменой Z и A в формулах (7.8) и (7.10) на

$$Z_{\text{эф}} = \sum_i \omega_i Z_i; \quad (7.11)$$

$$A_{\text{эф}} = Z_{\text{эф}} / (Z/A)_{\text{эф}}; \quad (7.12)$$

$$(Z/A)_{\text{эф}} = \sum_i \omega_i Z_i / A_i, \quad (7.13)$$

где ω_i — весовая доля i -го компонента с атомным номером Z_i и атомной массой A_i .

Расчеты E_0 , МэВ, можно выполнить также в диапазоне изменения указанных в п. 3 параметров по формуле [269]

$$E_0 = \frac{0,2}{a} \left(R_{\text{экс}}^2 + 1,9865 a R_{\text{экс}} \right)^{1/2}, \quad (7.14)$$

где $a = \frac{0,161 \cos(\theta_0/2)}{Z^{0,2}}$, а $R_{\text{экс}}$ выражено в г/см^2 .

5. Отношение $\bar{R}/R_{\text{экс}}$ зависит от E_0 , Z . Оно возрастает с увеличением Z и уменьшением E_0 . Например, для $E_0 = 1$ МэВ $\bar{R}/R_{\text{экс}} = 1,4$ для алюминия и 3,6 для свинца.

Таблица 7.3.

Радиационные $(dE/dx)_{\text{пол}}$, ионизационные $(dE/dx)_{\text{ион}}$ и полные dE/dx потери энергии, МэВ·см²·г⁻¹, средние пробеги \bar{R} , г/см², экстраполированные пробеги (нормальное падение) $R_{\text{экс}}$, г/см², моноэнергетических электронов и выход тормозного излучения Y_0

E_0 , МэВ	Алюминий ($I = 166$ эВ, $\rho = 2,699$ г/см ³)					Биологическая ткань ($I = 74,7$ эВ, $\rho = 1,04$ г/см ³) [*]						
	$(dE/dx)_{\text{пол}}$	$(dE/dx)_{\text{ион}}$	dE/dx	\bar{R}	$R_{\text{экс}}$	Y_0	$(dE/dx)_{\text{пол}}$	$(dE/dx)_{\text{ион}}$	dE/dx	\bar{R}	$R_{\text{экс}}$	Y_0
0,01	16,5	6,56—3*2	16,5	3,54—4	2,60—4	2,13—4	22,4	3,82—3	22,4	2,54—4	2,18—4	9,29—5
0,02	9,84	6,93—3	9,85	1,17—3	8,24—4	3,84—4	13,1	3,88—3	13,1	8,64—4	7,10—4	1,64—4
0,03	7,29	7,06—3	7,29	2,37—3	1,65—3	5,35—4	9,57	3,90—3	9,58	1,77—3	1,46—3	2,27—4
0,04	5,91	7,13—3	5,92	3,90—3	2,71—3	6,74—4	7,71	3,93—3	7,72	2,94—3	2,43—3	2,85—4
0,05	5,04	7,19—3	5,05	5,74—3	3,99—3	8,02—4	6,55	3,96—3	6,55	4,36—3	3,63—3	3,40—4
0,06	4,44	7,24—3	4,45	7,86—3	5,46—3	9,23—4	5,75	3,99—3	5,75	5,99—3	5,03—3	3,91—4
0,07	4,00	7,30—3	4,00	1,02—2	7,11—3	1,04—3	5,16	4,02—3	5,17	7,83—3	6,61—3	4,40—4
0,08	3,66	7,35—3	3,67	1,28—2	8,93—3	1,15—3	4,72	4,06—3	4,72	9,86—3	8,37—3	4,88—4
0,09	3,39	7,41—3	3,40	1,57—2	1,09—2	1,25—3	4,36	4,10—3	4,37	1,21—2	1,03—2	5,34—4
0,1	3,18	7,48—3	3,18	1,87—2	1,30—2	1,35—3	4,08	4,15—3	4,08	1,44—2	1,24—2	5,78—4
0,2	2,17	8,34—3	2,18	5,80—2	4,03—2	2,23—3	2,77	4,71—3	2,77	4,53—2	3,97—2	9,73—4
0,3	1,84	9,49—3	1,85	1,08—1	7,53—2	2,98—3	2,34	5,42—3	2,34	8,49—2	7,52—2	1,32—3
0,4	1,68	1,08—2	1,69	1,65—1	1,15—1	3,68—3	2,13	6,23—3	2,14	1,30—1	1,16—1	1,64—3
0,5	1,59	1,23—2	1,60	2,26—1	1,58—1	4,35—3	2,02	7,13—3	2,02	1,78—1	1,60—1	1,96—3
0,6	1,54	1,39—2	1,55	2,89—1	2,03—1	5,01—3	1,94	8,11—3	1,95	2,28—1	2,06—1	2,27—3
0,7	1,51	1,56—2	1,52	3,54—1	2,49—1	5,66—3	1,90	9,15—3	1,91	2,80—1	2,53—1	2,58—3
0,8	1,49	1,74—2	1,50	4,21—1	2,97—1	6,32—3	1,87	1,02—2	1,88	3,33—1	3,02—1	2,90—3
0,9	1,47	1,92—2	1,49	4,87—1	3,46—1	6,98—3	1,84	1,14—2	1,86	3,87—1	3,52—1	3,22—3
1,0	1,46	2,12—2	1,49	5,55—1	3,95—1	7,64—3	1,83	1,26—2	1,84	4,41—1	4,03—1	3,55—3
2,0	1,48	4,35—2	1,52	9,12—1	9,12—1	1,45—2	1,80	2,63—2	1,83	9,89—1	9,27—1	7,04—3
3,0	1,51	6,92—2	1,58	1,87	1,44	2,17—2	1,83	4,22—2	1,87	1,53	1,46	1,08—2
4,0	1,54	9,70—2	1,64	2,49	1,98	2,92—2	1,85	5,95—2	1,91	2,06	2,00	1,48—2
5,0	1,56	1,26—1	1,69	3,09	2,52	3,68—2	1,87	7,78—2	1,95	2,58	2,55	1,90—2

Продолжение табл. 7.3

E_0 , МэВ	Алюминий ($I = 166$ эВ, $\rho = 2,699$ г/см ³)				Биологическая ткань ($I = 74,7$ эВ, $\rho = 1,04$ г/см ³) ^{*1}							
	$(dE/dx)_{\text{hion}}$	$(dE/dx)_{\text{paa}}$	dE/dx	\bar{R}	$R_{\text{экс}}$	Y_0	$(dE/dx)_{\text{hion}}$	$(dE/dx)_{\text{paa}}$	dE/dx	\bar{R}	$R_{\text{экс}}$	Y_0
6,0	1,58	1,57—1	1,74	3,68	3,05	4,44—2	1,89	9,69—2	1,99	3,08	3,09	2,32—2
7,0	1,60	1,88—1	1,79	4,24	3,59	5,20—2	1,91	1,16—1	2,03	3,58	3,63	2,75—2
8,0	1,61	2,20—1	1,83	4,80	4,12	5,96—2	1,92	1,37—1	2,06	4,07	4,16	3,18—2
9,0	1,63	2,53—1	1,88	5,33	4,65	6,71—2	1,94	1,57—1	2,09	4,55	4,70	3,61—2
10,0	1,64	2,86—1	1,92	5,86	5,18	7,45—2	1,95	1,78—1	2,13	5,03	5,24	4,04—2

E_0 , МэВ	Вода ($I = 75$ эВ, $\rho = 1,0$ г/см ³) ^{*3}				Воздух ($I = 85,7$ эВ, $\rho = 0,001205$ г/см ³) ^{*4}							
	$(dE/dx)_{\text{hion}}$	$(dE/dx)_{\text{paa}}$	dE/dx	\bar{R}	$R_{\text{экс}}$	Y_0	$(dE/dx)_{\text{hion}}$	$(dE/dx)_{\text{paa}}$	dE/dx	\bar{R}	$R_{\text{экс}}$	Y_0
0,01	22,6	3,90—3	22,6	2,52—4	2,16—4	9,41—5	19,8	3,90—3	19,8	2,88—4	2,41—4	1,08—4
0,02	13,2	3,96—3	13,2	8,57—4	7,05—4	1,66—4	11,6	3,95—3	11,6	9,78—4	7,85—4	1,90—4
0,03	9,65	3,98—3	9,66	1,76—3	1,44—3	2,30—4	8,49	3,98—3	8,50	2,00—3	1,61—3	2,62—4
0,04	7,78	4,00—3	7,78	2,92—3	2,42—3	2,89—4	6,85	4,00—3	6,85	3,32—3	2,68—3	3,28—4
0,05	6,60	4,03—3	6,61	4,32—3	3,60—3	3,44—4	5,82	4,02—3	5,82	4,91—3	4,00—3	3,90—4
0,06	5,80	4,06—3	5,80	5,94—3	4,98—3	3,96—4	5,11	4,06—3	5,12	6,75—3	5,53—3	4,49—4
0,07	5,21	4,10—3	5,21	7,76—3	6,55—3	4,45—4	4,59	4,09—3	4,60	8,82—3	7,27—3	5,05—4
0,08	4,76	4,14—3	4,76	9,77—3	8,29—3	4,93—4	4,20	4,13—3	4,20	1,11—2	9,20—3	5,59—4
0,09	4,40	4,18—3	4,41	1,20—2	1,02—2	5,39—4	3,89	4,18—3	3,89	1,36—2	1,13—2	6,11—4
0,10	4,12	4,23—3	4,12	1,43—2	1,22—2	5,84—4	3,63	4,22—3	3,64	1,62—2	1,36—2	6,62—4
0,20	2,79	4,80—3	2,80	4,49—2	3,93—2	9,83—4	2,47	4,79—3	2,47	5,08—2	4,35—2	1,11—3
0,30	2,36	5,51—3	2,36	8,42—2	7,44—2	1,33—3	2,08	5,50—3	2,09	9,53—2	8,24—2	1,50—3
0,40	2,15	6,34—3	2,15	1,29—1	1,15—1	1,66—3	1,90	6,31—3	1,91	1,46—1	1,27—1	1,87—3
0,50	2,03	7,26—3	2,04	1,77—1	1,58—1	1,98—3	1,80	7,22—3	1,81	2,00—1	1,75—1	2,22—3
0,6	1,96	8,25—3	1,97	2,26—1	2,03—1	2,29—3	1,74	8,21—3	1,75	2,56—1	2,25—1	2,58—3
0,7	1,92	9,31—3	1,93	2,78—1	2,51—1	2,61—3	1,71	9,26—3	1,72	3,14—1	2,77—1	2,93—3

Продолжение табл. 7.3

E_0 , МэВ	Вода ($I = 75$ эВ, $\rho = 1,0$ г/см ³) ^{*3}				Воздух ($I = 85,7$ эВ, $\rho = 0,001205$ г/см ³) ^{*4}							
	$(dE/dx)_{\text{hion}}$	$(dE/dx)_{\text{paa}}$	dE/dx	\bar{R}	$R_{\text{экс}}$	Y_0	$(dE/dx)_{\text{hion}}$	$(dE/dx)_{\text{paa}}$	dE/dx	\bar{R}	$R_{\text{экс}}$	Y_0
0,8	1,89	1,04—2	1,90	3,30—1	2,99—1	2,93—3	1,68	1,04—2	1,69	3,72—1	3,33—1	3,28—3
0,9	1,86	1,16—2	1,88	3,83—1	3,48—1	3,25—3	1,67	1,15—2	1,68	4,32—1	3,85—1	3,64—3
1,0	1,85	1,28—2	1,86	4,37—1	3,98—1	3,58—3	1,66	1,27—2	1,67	4,91—1	4,41—1	4,00—3
2,0	1,82	2,68—2	1,85	9,78—1	9,17—1	7,08—3	1,68	2,66—2	1,71	1,08	1,02	7,75—3
3,0	1,85	4,30—2	1,89	1,51	1,45	1,09—2	1,74	4,26—2	1,78	1,66	1,60	1,17—2
4,0	1,87	6,06—2	1,93	2,04	1,98	1,50—2	1,79	6,00—2	1,85	2,21	2,19	1,58—2
5,0	1,89	7,92—2	1,97	2,55	2,52	1,91—2	1,83	7,84—2	1,91	2,74	2,79	2,00—2
6,0	1,91	9,85—2	2,01	3,05	3,05	2,34—2	1,87	9,75—2	1,97	3,26	3,38	2,42—2
7,0	1,93	1,18—1	2,05	3,54	3,59	2,77—2	1,90	1,17—1	2,02	3,76	3,97	2,84—2
8,0	1,94	1,39—1	2,08	4,03	4,12	3,20—2	1,93	1,38—1	2,07	4,25	4,56	3,27—2
9,0	1,96	1,60—1	2,12	4,51	4,65	3,64—2	1,96	1,58—1	2,12	4,72	5,15	3,69—2
10,0	1,97	1,81—1	2,15	4,98	5,18	4,07—2	1,98	1,80—1	2,16	5,19	5,74	4,11—2

E_0 , МэВ	Железо ($I = 286$ эВ, $\rho = 7,87$ г/см ³)				Медь ($I = 322,0$ эВ, $\rho = 8,96$ г/см ³)							
	$(dE/dx)_{\text{hion}}$	$(dE/dx)_{\text{paa}}$	dE/dx	\bar{R}	$R_{\text{экс}}$	Y_0	$(dE/dx)_{\text{hion}}$	$(dE/dx)_{\text{paa}}$	dE/dx	\bar{R}	$R_{\text{экс}}$	Y_0
0,01	13,9	1,14—2	13,9	4,33—4	2,75—4	4,20—4	13,2	1,21—2	13,2	4,60—4	2,80—4	4,70—4
0,02	8,46	1,30—2	8,47	1,39—3	8,29—4	8,01—4	8,07	1,40—2	8,08	1,46—3	8,36—4	9,02—4
0,03	6,32	1,37—2	6,33	2,77—3	1,61—3	1,15—3	6,04	1,49—2	6,06	2,91—3	1,62—3	1,30—3
0,04	5,15	1,41—2	5,16	4,54—3	2,59—3	1,48—3	4,93	1,54—2	4,95	4,75—3	2,59—3	1,67—3
0,05	4,41	1,45—2	4,42	6,64—3	3,75—3	1,78—3	4,23	1,58—2	4,24	6,95—3	3,74—3	2,02—3
0,06	3,89	1,47—2	3,91	9,05—3	5,07—3	2,07—3	3,74	1,62—2	3,75	9,46—3	5,04—3	2,36—3
0,07	3,51	1,49—2	3,53	1,18—2	6,53—3	2,35—3	3,38	1,64—2	3,39	1,23—2	6,48—3	2,67—3
0,08	3,22	1,51—2	3,24	1,47—2	8,13—3	2,61—3	3,10	1,66—2	3,11	1,54—2	8,06—3	2,98—3
0,09	2,99	1,53—2	3,01	1,79—2	9,85—3	2,86—3	2,88	1,69—2	2,89	1,87—2	9,76—3	3,27—3
0,1	2,80	1,55—2	2,82	2,14—2	1,17—2	3,11—3	2,70	1,71—2	2,72	2,22—2	1,16—2	3,55—3

Продолжение табл. 7.3

E _α , МэВ	Железо (I = 286,0 эВ, ρ = 7,87 г/см ³)					Медь (I = 322,0 эВ, ρ = 8,96 г/см ³)					
	(dE/dx) _{хол}	(dE/dx) _{паз}	dE/dx	R _{экс}	Y ₀	(dE/dx) _{хол}	(dE/dx) _{паз}	dE/dx	R _{экс}	Y ₀	
0,2	1,93	1,74-2	1,95	3,50-2	5,19-3	1,86	1,93-2	1,88	6,81-2	3,45-2	5,95-3
0,3	1,64	1,96-2	1,66	6,44-2	6,92-3	1,58	2,17-2	1,60	1,26-1	6,34-2	7,94-3
0,4	1,50	2,21-2	1,52	9,78-2	8,49-3	1,44	2,45-2	1,47	1,92-1	9,62-2	9,74-3
0,5	1,42	2,49-2	1,44	1,34-1	9,97-3	1,37	2,76-2	1,40	2,62-1	1,32-1	1,14-2
0,6	1,37	2,79-2	1,40	3,23-1	1,14-2	1,33	3,09-2	1,36	3,34-1	1,69-1	1,31-2
0,7	1,34	3,11-2	1,38	2,11-1	1,28-2	1,30	3,44-2	1,33	4,09-1	2,08-1	1,47-2
0,8	1,33	3,45-2	1,36	2,52-1	1,42-2	1,28	3,80-2	1,32	4,84-1	2,48-1	1,62-2
0,9	1,32	3,80-2	1,35	2,94-1	1,56-2	1,27	4,18-2	1,31	5,60-1	2,89-1	1,78-2
1,0	1,31	4,16-2	1,35	3,36-1	1,70-2	1,26	4,58-2	1,31	6,37-1	3,31-1	1,94-2
2,0	1,32	8,32-2	1,40	7,80-1	3,10-2	1,27	9,10-2	1,36	1,39	7,70-1	3,51-2
3,0	1,35	1,31-1	1,48	1,24	4,53-2	1,30	1,42-1	1,45	2,10	1,23	5,10-2
4,0	1,38	1,81-1	1,56	1,70	5,95-2	1,33	1,98-1	1,53	2,77	1,68	6,67-2
5,0	1,40	2,35-1	1,64	2,17	7,36-2	1,36	2,55-1	1,61	3,41	2,14	8,21-2
6,0	1,42	2,90-1	1,71	2,63	8,74-2	1,38	3,15-1	1,69	4,01	2,60	9,71-2
7,0	1,44	3,46-1	1,79	3,09	1,01-1	1,40	3,76-1	1,77	4,59	3,06	1,12-1
8,0	1,46	4,04-1	1,86	3,55	1,14-1	1,41	4,38-1	1,85	5,14	3,51	1,26-1
9,0	1,47	4,62-1	1,93	4,00	1,27-1	1,42	5,01-1	1,92	5,67	3,96	1,39-1
10,0	1,48	5,22-1	2,01	4,45	1,39-1	1,44	5,65-1	2,00	6,18	4,40	1,53-1

E_α,
МэВ

E _α , МэВ	Плексиглас (C ₅ H ₈ O ₂) (I = 74,0 эВ, ρ = 1,19 г/см ³)*5					Свинец (I = 823,0 эВ, ρ = 11,35 г/см ³)					
	(dE/dx) _{хол}	(dE/dx) _{паз}	dE/dx	R _{экс}	Y ₀	(dE/dx) _{хол}	(dE/dx) _{паз}	dE/dx	R _{экс}	Y ₀	
0,01	22,0	3,33-3	22,0	2,20-4	8,33-5	8,43	2,04-2	8,45	8,25-4	2,71-4	1,19-3
0,02	12,8	3,37-3	12,8	7,22-4	1,46-4	5,45	2,69-2	5,48	2,34-3	6,85-4	2,43-3
0,03	9,40	3,39-3	9,40	1,80-3	2,02-4	4,18	3,09-2	4,21	4,44-3	1,21-3	3,66-3
0,04	7,57	3,41-3	7,58	3,00-3	2,49-3	3,46	3,38-2	3,50	7,07-3	1,83-3	4,87-3

Продолжение табл. 7.3

E _α , МэВ	Плексиглас (C ₅ H ₈ O ₂) (I = 74,0 эВ, ρ = 1,19 г/см ³)*5					Свинец (I = 823,0 эВ, ρ = 11,35 г/см ³)					
	(dE/dx) _{хол}	(dE/dx) _{паз}	dE/dx	R _{экс}	Y ₀	(dE/dx) _{хол}	(dE/dx) _{паз}	dE/dx	R _{экс}	Y ₀	
0,05	6,43	3,44-3	6,43	4,44-3	3,01-4	3,00	3,61-2	3,03	1,02-2	2,54-3	6,06-3
0,06	5,64	3,47-3	5,65	6,10-3	3,46-4	2,67	3,82-2	2,71	1,36-2	3,53-3	7,21-3
0,07	5,07	3,50-3	5,07	7,97-3	3,90-4	2,43	4,00-2	2,47	1,75-2	4,19-3	8,35-3
0,08	4,63	3,54-3	4,64	1,00-2	8,65-3	2,24	4,16-2	2,28	2,18-2	5,12-3	9,46-3
0,09	4,29	3,58-3	4,29	1,23-2	1,07-2	2,09	4,31-2	2,13	2,63-2	6,11-3	1,06-2
0,1	4,01	3,62-3	4,01	1,47-2	5,12-4	1,96	4,45-2	2,01	3,11-2	7,16-3	1,16-2
0,2	2,72	4,13-3	2,72	4,61-2	1,28-2	1,39	5,56-2	1,44	9,18-2	2,04-2	2,12-2
0,3	2,29	4,75-3	2,30	8,65-2	7,90-2	1,19	6,46-2	1,26	1,67-1	3,76-2	2,92-2
0,4	2,09	5,47-3	2,10	1,32-1	1,22-1	1,10	7,34-2	1,18	2,49-1	5,75-2	3,61-2
0,5	1,98	6,28-3	1,98	1,82-1	1,68-1	1,05	8,23-2	1,14	3,36-1	7,97-2	4,24-2
0,6	1,90	7,15-3	1,91	2,33-1	2,17-1	1,03	9,13-2	1,12	4,25-1	1,04-1	4,82-2
0,7	1,86	8,08-3	1,86	2,86-1	2,67-1	1,01	1,00-1	1,11	5,15-1	1,29-1	5,36-2
0,8	1,82	9,05-3	1,83	3,40-1	3,19-1	1,00	1,10-1	1,11	6,05-1	1,55-1	5,88-2
0,9	1,80	1,01-2	1,81	3,95-1	3,72-1	9,96-1	1,19-1	1,12	6,95-1	1,83-1	6,37-2
1,0	1,79	1,11-2	1,80	4,50-1	4,25-1	9,94-1	1,29-1	1,12	7,84-1	2,12-1	6,84-2
2,0	1,76	2,34-2	1,78	1,01	9,78-1	1,02	2,32-1	1,26	1,63	5,27-1	1,10-1
3,0	1,78	3,76-2	1,82	1,57	1,54	1,06	3,43-1	1,41	2,38	8,69-1	1,45-1
4,0	1,81	5,31-2	1,86	2,11	2,11	1,10	4,58-1	1,55	3,06	1,22	1,76-1
5,0	1,83	6,94-2	1,90	2,64	2,68	1,12	5,77-1	1,70	3,67	1,57	2,04-1
6,0	1,85	8,65-2	1,94	3,16	3,25	1,14	6,99-1	1,84	4,24	1,92	2,30-1
7,0	1,87	1,04-1	1,97	3,67	3,82	1,16	8,23-1	1,98	4,76	2,27	2,54-1
8,0	1,88	1,22-1	2,00	4,18	4,39	1,18	9,50-1	2,12	5,25	2,61	2,76-1
9,0	1,90	1,41-2	2,04	4,67	4,95	1,19	1,08	2,27	5,70	2,95	2,97-1
10,0	1,91	1,60-1	2,07	5,16	5,52	1,20	1,21	2,41	6,13	3,28	3,16-1

Продолжение табл. 7.3

$E_{\text{и}}$, МэВ	Титан ($I=233,0$ эВ, $\rho=4,54$ г/см ³)					Углерод (графит) ($I=78,0$ эВ, $\rho=2,265$ г/см ³)						
	$(dE/dx)_{\text{ион}}$	$(dE/dx)_{\text{фраг}}$	dE/dx	\bar{R}	$R_{\text{экв}}$	Y_0	$(dE/dx)_{\text{ион}}$	$(dE/dx)_{\text{фраг}}$	dE/dx	\bar{R}	$R_{\text{экв}}$	Y_0
	0.01	14,5	9,84-3	14,5	4,10-4	2,79-4	3,51-4	20,1	3,15-3	20,1	2,82-4	2,37-4
0.02	8,74	1,10-2	8,75	1,33-3	8,51-4	6,63-4	11,8	3,18-3	11,8	9,60-4	7,77-4	1,51-4
0.03	6,50	1,15-2	6,51	2,68-3	1,67-3	9,47-4	8,62	3,19-3	8,63	1,97-3	1,60-3	2,07-4
0.04	5,29	1,18-2	5,30	4,39-3	2,70-3	1,21-3	6,95	3,22-3	6,95	3,27-3	2,69-3	2,60-4
0.05	4,52	1,20-2	4,53	6,44-3	3,92-3	1,46-3	5,90	3,24-3	5,90	4,84-3	4,03-3	3,09-4
0.06	3,99	1,22-2	4,00	8,79-3	5,31-3	1,69-3	5,18	3,27-3	5,18	6,65-3	5,60-3	3,56-4
0.07	3,60	1,23-2	3,61	1,14-2	6,86-3	1,91-3	4,65	3,30-3	4,65	8,69-3	7,38-3	4,01-4
0.08	3,30	1,25-2	3,31	1,43-2	8,56-3	2,12-3	4,25	3,34-3	4,25	1,09-2	9,37-3	4,44-4
0.09	3,06	1,26-2	3,07	1,75-2	1,04-2	2,32-3	3,93	3,38-3	3,93	1,34-2	1,15-2	4,86-4
0.1	2,87	1,27-2	2,88	2,08-2	1,23-2	2,51-3	3,67	3,41-3	3,68	1,60-2	1,39-2	5,27-4
0.2	1,97	1,42-2	1,98	6,42-2	3,72-2	4,18-3	2,48	3,90-3	2,49	5,04-2	4,51-2	8,92-4
0.3	1,67	1,60-2	1,69	1,19-1	6,88-2	5,56-3	2,08	4,49-3	2,09	9,47-2	8,60-2	1,22-3
0.4	1,53	1,81-2	1,55	1,82-1	1,04-1	6,82-3	1,89	5,17-3	1,90	1,45-1	1,33-1	1,52-3
0.5	1,45	2,04-2	1,47	2,48-1	1,43-1	8,02-3	1,78	5,94-3	1,79	2,00-1	1,83-1	1,82-3
0.6	1,40	2,30-2	1,42	3,17-1	1,84-1	9,19-3	1,72	6,76-3	1,72	2,57-1	2,36-1	2,12-3
0.7	1,37	2,57-2	1,40	3,88-1	2,26-1	1,03-2	1,67	7,64-3	1,68	3,16-1	2,91-1	2,42-3
0.8	1,36	2,85-2	1,38	4,60-1	2,69-1	1,15-2	1,64	8,56-3	1,65	3,76-1	3,48-1	2,73-3
0.9	1,34	3,14-2	1,37	5,33-1	3,13-1	1,26-2	1,62	9,52-3	1,63	4,37-1	4,05-1	3,04-3
1.0	1,34	3,45-2	1,37	6,06-1	3,58-1	1,38-2	1,61	1,05-2	1,62	4,98-1	4,63-1	3,35-3

Продолжение табл. 7.3

$E_{\text{и}}$, МэВ	Титан ($I=233,0$ эВ, $\rho=4,54$ г/см ³)					Углерод (графит) ($I=78,0$ эВ, $\rho=2,265$ г/см ³)						
	$(dE/dx)_{\text{ион}}$	$(dE/dx)_{\text{фраг}}$	dE/dx	\bar{R}	$R_{\text{экв}}$	Y_0	$(dE/dx)_{\text{ион}}$	$(dE/dx)_{\text{фраг}}$	dE/dx	\bar{R}	$R_{\text{экв}}$	Y_0
	2.0	1,34	6,94-2	1,41	1,33	8,31-1	2,54-2	1,59	2,21-2	1,61	1,12	1,07
3.0	1,38	1,09-1	1,48	2,02	1,32	3,74-2	1,61	3,56-2	1,65	1,74	1,68	1,04-2
4.0	1,40	1,52-1	1,56	2,68	1,81	4,95-2	1,64	5,03-2	1,69	2,34	2,30	1,42-2
5.0	1,43	1,97-1	1,63	3,30	2,30	6,15-2	1,66	6,58-2	1,72	2,92	2,92	1,82-2
6.0	1,45	2,44-1	1,70	3,91	2,79	7,34-2	1,68	8,19-2	1,76	3,50	3,54	2,22-2
7.0	1,47	2,92-1	1,76	4,48	3,28	8,50-2	1,69	9,86-2	1,79	4,06	4,16	2,63-2
8.0	1,48	3,41-1	1,82	5,04	3,77	9,64-2	1,71	1,16-1	1,82	4,61	4,78	3,04-2
9.0	1,50	3,91-1	1,89	5,58	4,25	1,08-1	1,72	1,33-1	1,85	5,16	5,40	3,46-2
10.0	1,51	4,41-1	1,95	6,10	4,73	1,18-1	1,73	1,51-1	1,88	5,69	6,01	3,87-2

*1 Данные для попереуно-полосатых мышц, состав по массе в процентах: Н — 10,2; С — 12,3; N — 3,5; O — 72,9; Na — 0,08; Mg — 0,02; P — 0,2; S — 0,5; K — 0,3.

*2 Читать как $6,56 \cdot 10^{-3}$.

*3 Состав по массе, в %: Н—11,2; O—88,8.

*4 Воздух сухой на уровне моря (20°C), состав по массе, %: С — 0,0124; N — 75,53; O — 23,18; Ar — 1,283.

*5 Состав по массе, %: Н — 8; С — 60; O — 32.

6. Максимальный пробег в г/см^2 β -частиц в алюминии с энергией в диапазоне 0,5—3 МэВ с погрешностью $\pm 5\%$ описывается формулой [14]

$$R_{\beta_{\text{макс}}} = 0,52E_{\beta} - 0,09, \quad (7.15)$$

где E_{β} — граничная энергия β -частиц, МэВ.

7. Для оценок максимальных пробегов β -частиц в алюминии в мм и в воздухе в см можно пользоваться приближенными соотношениями [9]:

$$R_{\beta_{\text{макс}}} \approx 2,5E_{\beta} \text{ для алюминия}, \quad (7.16)$$

$$R_{\beta_{\text{макс}}} \approx 450E_{\beta} \text{ для воздуха}, \quad (7.17)$$

где E_{β} выражено в МэВ. При $E_{\beta} = (0,5 \div 10)$ МэВ погрешность формулы (7.16) не превышает 20%, погрешность формулы (7.17) не превышает 30%.

В табл. 7.3 для моноэнергетических электронов приведены следующие данные: а) ионизационные $(dE/dx)_{\text{ион}}$, радиационные $(dE/dx)_{\text{рад}}$ и полные dE/dx потери энергии электронов, $\text{МэВ}/(\text{г/см}^2) = \text{МэВ} \cdot \text{см}^2 \cdot \text{г}^{-1}$ [270]; б) средние пробеги электронов \bar{R} , г/см^2 [270]; в) экстраполированные (практические) пробеги электронов $R_{\text{экс}}$, г/см^2 , рассчитанные по формуле (7.8); г) выход тормозного излучения Y_0 , представляющий собой долю первоначальной энергии электрона E_0 , преобразованную в энергию тормозного излучения, до полной его остановки. Обратим внимание, что Y_0 связано со значением величины Y_c в формуле (2.41) соотношением $Y_c = Y_0 E_0$. Приведенные в табл. 7.3 значения Y_0 рассчитаны в предположении модели непрерывного замедления без учета самопоглощения. Поэтому соответствующие значения $Y_c = Y_0 E_0$ превышают экспериментальные значения Y_c , определяемые формулой (2.41) с коэффициентами, приведенными в табл. 2.5. Заметим, что в табл. 7.3 для каждого вещества рядом с его наименованием указаны средняя энергия возбуждения I и плотность ρ .

ЗАЩИТА ОТ ТОРМОЗНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НУКЛИДОВ

Для точечных изотропных радионуклидов, испускающих β -частицы и (или) моноэнергетические электроны конверсии, рекомендуется следующая последовательность расчетов: а) определяют по формулам (2.40) — (2.43) выход тормозного излучения на 1 распад ядра; б) определяют в точке детектирования на заданном расстоянии от источника мощность эквивалентной дозы тормозного излучения β -частиц \dot{H}_{β} и (или) электронов конверсии \dot{H}_c ; в) определяют требуемую кратность ослабления излучения защитой:

$$k = \frac{\dot{H}_{\beta} + \dot{H}_c}{\text{ДМД}}, \quad (7.18)$$

где ДМД — предельно допустимая мощность эквивалентной дозы в точке детектирования; г) если $k > 1$, рассчитывают по универсальным таблицам методом конкурирующих линий требуемую толщину защиты.

Для оценок с достаточной для практических задач точностью расчеты мощности эквивалентной дозы и определение толщины защиты по универсальным таблицам можно проводить для эффективной энергии фотонов тормозного излучения $E_{\text{эф}}$. Под *эффективной энергией* по-

нимается энергия фотонов такого моноэнергетического фотонного излучения, относительное ослабление которого в поглотителе определенного состава и определенной толщины такое же, как у рассматриваемого моноэнергетического фотонного излучения, в данном случае — тормозного излучения. Для рассматриваемой здесь задачи $E_{\text{эф}}$ можно принять равной половине максимальной энергии β -частиц.

Энергия тормозного излучения для нуклидов обычно ниже порога реакции (γ , n), поэтому не возникает задача защиты от фотонейтронов.

ЗАЩИТА ОТ ТОРМОЗНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ И (ИЛИ) ФОТОНЕЙТРОНОВ НА ЭЛЕКТРОННЫХ УСКОРИТЕЛЯХ

На рис. 7.2 и 7.3 приведена зависимость мощности показателя тканевой поглощенной дозы тормозного излучения, возникающего при нормальном падении моноэнергетических электронов на мишень оптимальной толщины с наиболее высоким выходом тормозного излучения с высоким Z ($Z > 73$), для стандартного расстояния от мишени 1 м при токе 1 мА под разными углами θ от направления распространения пучка электронов ускорителя [271]. Заметим, что показатель тканевой поглощенной дозы определяется как максимальное значение поглощенной тканевой дозы внутри шара из тканезквивалентного материала диаметром 30 см и плотностью 1 г/см^3 .

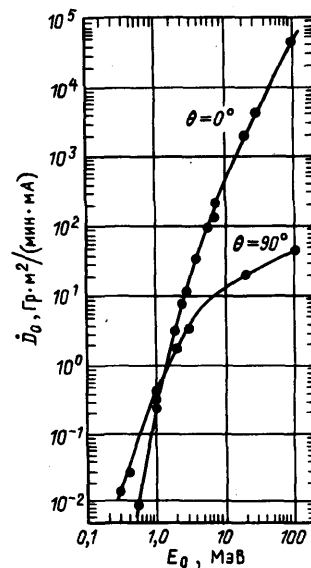


Рис. 7.2. Мощность показателя тканевой поглощенной дозы тормозного излучения \dot{D}_0 в зависимости от энергии электронов E_0 для θ , равного 0 и 90° , по данным разных авторов [271]

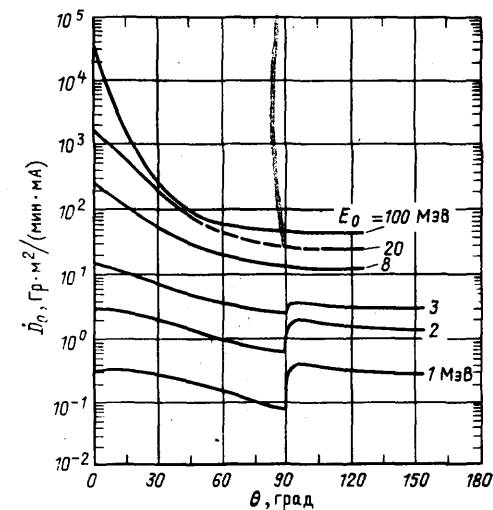


Рис. 7.3. Угловая зависимость мощности показателя тканевой поглощенной дозы тормозного излучения \dot{D}_0 для разных энергий электронов E_0 [271]

При использовании мишеней из других материалов данные рис. 7.2 для $\theta=0^\circ$ и 90° могут быть домножены на коэффициенты f , приведенные в табл. 7.4.

Таблица 7.4

Коэффициент f для определения поля тормозного излучения для мишеней с невысокими Z [271]

Материал мишени	Z	f	
		$\theta=0^\circ$	$\theta=90^\circ$
Алюминий (бетон)	13	0,5	0,3*
Железо	26	0,7	0,5*
Медь	29	0,7	0,5*

* Для электронов с энергией до 10 МэВ. При больших энергиях можно принимать $f=1$.

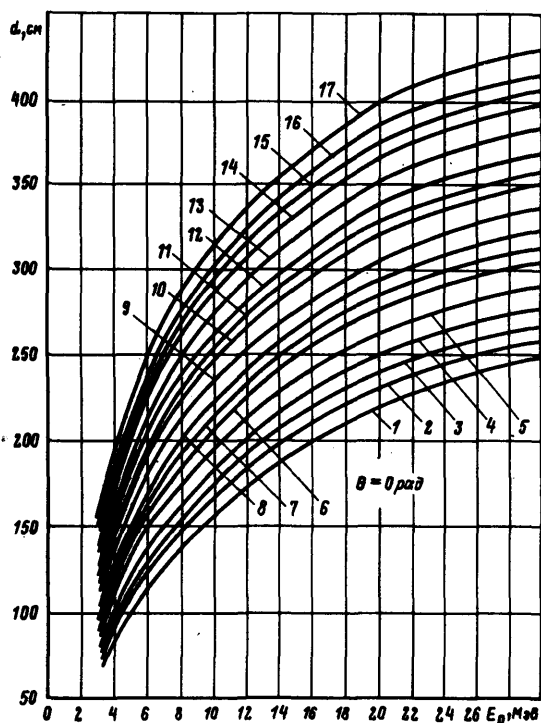


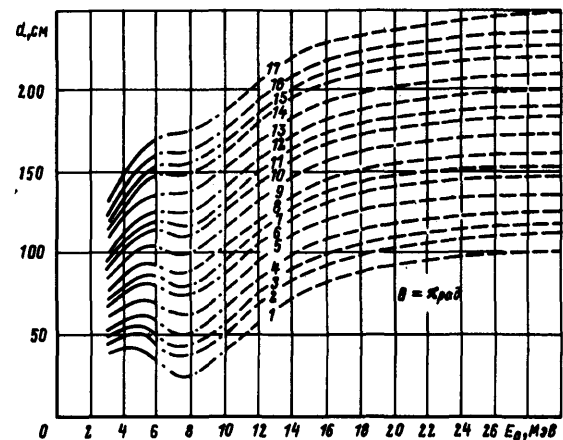
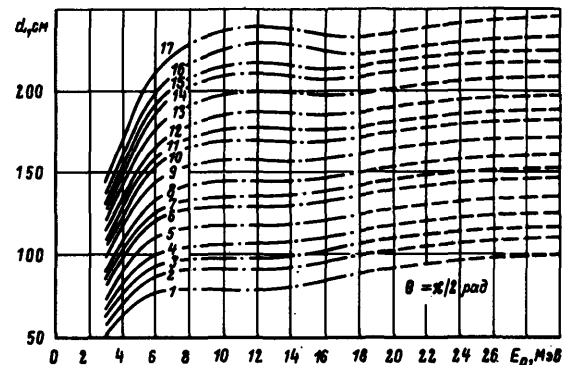
Рис. 7.4. Номограмма для определения требуемой толщины защиты из бетона в направлении θ в зависимости от энергии электронов E_0 для различных значений κ : 0,01 (1), 0,02 (2); 0,03 (3); 0,05 (4); 0,1 (5); 0,2 (6); 0,3 (7); 0,5 (8); 1,0 (9); 2,0 (10); 3,0 (11); 5,0 (12); 10 (13); 20 (14); 30 (15); 50 (16); 100 (17). Защита обусловлена: — — — тормозным излучением; — — — фотонейтронами; — · — — тормозным излучением и фотонейтронами

Выход фотонейтронов из мишени может быть оценен по данным рис. 2.5.

Для определения толщины d защиты из бетона ($\rho=2,3 \text{ г/см}^3$) от тормозного излучения и (или) фотонейтронов под различными углами θ ($\theta=0, \pi/2, \pi$ рад) к направлению падающего пучка моноэнергетических электронов с энергией $E_0 \leq 30$ МэВ следует использовать номограммы рис. 7.4 [272].

Параметром номограмм является $\kappa=i/R^2$, где i — средний ток на мишени, мкА (средний ток легко пересчитать в поток частиц по известному заряду электрона, равному $1,602 \cdot 10^{-19}$ Кл); R — расстояние от мишени ускорителя до точки детектирования, м. На номограммах показано, каким видом излучения для данной энергии электронов, угла θ и значения κ обусловлена защита.

Расчеты номограмм выполнили для условий профессионального облучения, для мишени оптимальной толщины и максимально возможного атомного номера Z , предполагая полное поглощение электронного и фотонного пучков в мишени.



§ 8.1. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ

Явление отражения (*альbedo*)* излучения имеет две стороны — негативную и позитивную. С негативной стороной мы сталкиваемся всякий раз, когда отраженное от окружающих тел излучение дает дополнительный вклад в поле излучения, приводит к повышению уровня облучения обслуживающего персонала и требует принятия соответствующих мер для уменьшения мощности дозы излучения. Например, в задачах определения поля излучения в воздухе вблизи границы с Землей неучет отраженного от Земли излучения может привести к значительной недооценке поля [273]. С позитивной стороной явления мы встречаемся, когда используем закономерности обратного рассеяния излучений для распознавания качеств отражателя. В обеих задачах необходимо знать характеристики отраженного излучения [274,275].

В наиболее общем виде поле обратного рассеянного излучения определяется всеми условиями задачи: энергией, угловым распределением излучения и геометрией источника, формой и компоновкой рассеивателя, взаимным расположением источника, рассеивателя и точки детектирования, пороговой энергией детектирования, а также граничащей с рассеивателем средой, в которой находятся источник излучения и детектор. Ниже рассмотрим случай, когда рассеиватель находится в воздухе, при этом поглощением и рассеянием излучения в воздухе можно пренебречь.

Предположим, что во всех случаях источник моноэнергетический с энергией частиц или фотонов E_0 . Если критерием классификации выбрать характеристику источника (угловое распределение излучения и геометрию), то для наиболее распространенной полубесконечной геометрии рассеивателя можно указать три основных часто встречающихся варианта задачи: 1) на рассеиватель под произвольным углом θ_0 падает излучение точечного мононаправленного источника (тонкого луча); 2) на рассеиватель под произвольным углом θ_0 падает излучение бесконечного плоского мононаправленного источника; 3) вблизи рассеивателя на некотором расстоянии от него находится точечный изотропный источник.

Наиболее элементарна первая задача, так как по полю обратного рассеяния тонкого луча при помощи преобразований можно сформировать поля отраженного излучения для других источников.

Поэтому ниже ограничимся основными определениями применительно к задаче обратного рассеяния тонкого луча.

В зависимости от задания падающего и отраженного излучения в токовых или потоковых характеристиках встречаются *токовые* a и *потоковые* A характеристики альbedo.

Различаются *дифференциальные* и *интегральные* характеристики альbedo. Наиболее подробная информация о поле обратного рассеяния задается дважды дифференциальными спектральными характеристиками

* «Альbedo» в переводе с латинского языка означает «белизна». Это понятие связано со свойствами «белого» тела отражать излучение.

альbedo (дифференциальные по отношению к направлению вылета частиц или фотонов и к положению площадки, через которую отраженное излучение покидает рассеиватель).

Под *дважды дифференциальным спектральным токовым альbedo тонкого луча*, $dN_{\text{пад}}$ частиц которого с энергией E_0 падает на полубесконечный рассеиватель* в точку O в начале координат под углом θ_0 к нормали (рис. 8.1, а), будем понимать отношение числа частиц $dN_{\text{отр}}$ с энергией от E до $E+dE$, выходящих (отраженных) за интервал времени dt через элементарную площадку dS на поверхности отражателя, центрированную в точке с координатами $(x, y, z=0)$, и распространяющихся в направлениях, определенных элементарным телесным углом $d\Omega$, содержащим данное направление (θ, φ) , к числу падающих на отражатель частиц $dN_{\text{пад}}$ за тот же интервал времени dt , к площади элементарной площадки dS , к энергетическому интервалу dE и к элементарному телесному углу $d\Omega$. Обозначим эту величину через $a_c(E_0, \theta_0; E, \theta, \varphi, x, y)$. Угол θ — полярный, φ — азимутальный. Очевидно, что $a_c(E_0, \theta_0; E, \theta, \varphi, x, y) = dN_{\text{отр}} / (dN_{\text{пад}} dS dE d\Omega)$. Единица дважды дифференциального спектрального альbedo $1 / (\text{см}^2 \cdot \text{МэВ} \cdot \text{ср})$.

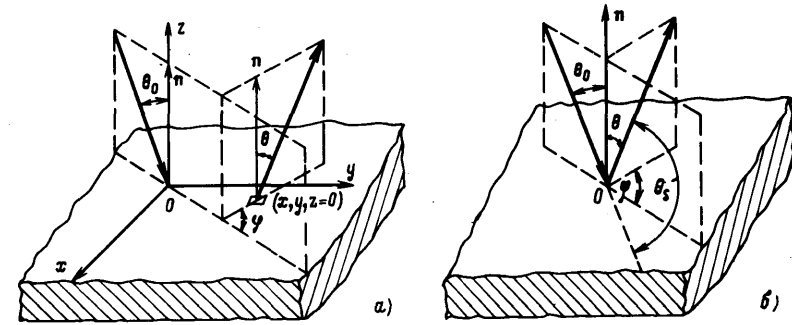


Рис. 8.1. К определению дважды дифференциального (а) и дифференциального (б) альbedo.

Подобно дважды дифференциальному спектральному альbedo можно дать определение *дважды дифференциального числового, энергетического или дозового альbedo*, если детектировать при тех же условиях не энергетический спектр отраженного излучения, а число частиц, энергию или дозу отраженных частиц соответственно.

Под отраженным излучением в определении дважды дифференциального альbedo понимается как однократно или многократно обратно рассеянное первичное излучение самого источника, так и собственно вторичное излучение того же вида, что и излучение источника (например, аннигиляционное, тормозное, флуоресцентное излучение для источников фотонов или нейтроны, образуемые по реакции $(n, 2n)$, для источников нейтронов).

* Зависимость поля излучения от толщины и кривизны рассеивателя удобно выделять отдельно, связывая их с характеристиками полубесконечного рассеивателя.

В ряде задач через поверхность, на которую падает первичное излучение источника одного вида, выходит излучение другого сорта (например, захватное γ -излучение для источника нейтронов). В таких задачах мы отходим от понятия «альbedo». Это явление называется *квазиальbedo* (мнимое альbedo). Квазиальbedo ниже не рассматривается.

Размерами области рассеяния на поверхности отражателя часто можно пренебречь, считая, что рассеянное излучение покидает рассеиватель в той же области, где оно входит в него. Это предположение справедливо, когда максимальные линейные размеры области рассеяния значительно меньше расстояния до точки детектирования. В этой задаче наиболее подробная информация о поле обратного рассеяния задается *дифференциальным спектральным альbedo*

$$a_c(E_0, \theta_0; E, \theta, \varphi) = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} a_c(E_0, \theta_0; E, \theta, \varphi, x, y) dx dy. \quad (8.1)$$

Для решения практических задач вводятся также следующие дифференциальные характеристики альbedo:

дифференциальное числовое альbedo

$$a_4(E_0, \theta_0; \theta, \varphi) = \int_0^{E_0} a_c(E_0, \theta_0; E, \theta, \varphi) dE, \quad (8.2)$$

дифференциальное энергетическое альbedo

$$a_3(E_0, \theta_0; \theta, \varphi) = \frac{1}{E_0} \int_0^{E_0} a_c(E_0, \theta_0; E, \theta, \varphi) E dE, \quad (8.3)$$

дифференциальное дозовое альbedo

$$a_d(E_0, \theta_0; \theta, \varphi) = \frac{1}{\delta(E_0)} \int_0^{E_0} a_c(E_0, \theta_0; E, \theta, \varphi) \delta(E) dE, \quad (8.4)$$

где $\delta(E)$ — коэффициент перевода плотности потока излучения с энергией E в мощность дозы; в зависимости от регистрируемого эффекта различают дозовое альbedo по поглощенной дозе, по эквивалентной дозе, по экспозиционной дозе и т. д.

Характеристикам альbedo, определенным по формулам (8.1) — (8.4), соответствует геометрия, показанная на рис. 8.1, б, где θ_s — угол рассеяния частицы. Единица дифференциального спектрального альbedo, определяемого формулой (8.1), $1/(МэВ \cdot \text{ср})$, а единица дифференциальных характеристик, определяемых формулами (8.2) — (8.4), $1/\text{ср}$.

Интегрированием дифференциальных характеристик по телесному углу отражения 2π ср можно получить соответствующие *интегральные характеристики*, например, для спектрального альbedo:

$$a_c(E_0, \theta_0; E) = \int_0^{2\pi} d\varphi \int_0^{\pi/2} a_c(E_0, \theta_0; E, \theta, \varphi) \sin\theta d\theta. \quad (8.5)$$

Единица $a_c(E_0, \theta_0; E)$ — $1/МэВ$, другие интегральные характеристики — безразмерные единицы.

Часто необходимо иметь информацию о характеристиках альbedo для источников с различными непрерывными энергетическими спектрами излучения. Такую информацию можно получить на основе данных по характеристикам альbedo для широкого набора моноэнергетических источников. Однако в некоторых случаях, например для источников нейтронов, использование данных по альbedo для ограниченного набора моноэнергетических источников при определении альbedo для непрерывного спектра может привести к значительным погрешностям, обусловленным нерегулярным ходом зависимости альbedo для некоторых рассеивателей от энергии. В этих случаях для усреднения данных по отраженному излучению по многим резонансам сечения целесообразно иметь альbedo для непрерывного набора источников, задаваемых по энергии в виде импульсов в узких энергетических интервалах $\Delta E_0 = E_{0\text{макс}} - E_{0\text{мин}}$.

Приведенные выше характеристики даны по току. *Потоковые дифференциальные характеристики альbedo* $A(E_0, \theta_0; \theta, \varphi)$ связаны с соответствующими токовыми характеристиками $a(E_0, \theta_0; \theta, \varphi)$ соотношением

$$A(E_0, \theta_0; \theta, \varphi) = \frac{\cos\theta_0}{\cos\theta} a(E_0, \theta_0; \theta, \varphi). \quad (8.6)$$

Потоковые интегральные характеристики $A(E_0, \theta_0)$ выражаются через токовые дифференциальные $a(E_0, \theta_0; \theta, \varphi)$ по формуле

$$A(E_0, \theta_0) = \cos\theta_0 \int_0^{2\pi} d\varphi \int_0^{\pi/2} a(E_0, \theta_0; \theta, \varphi) \text{tg}\theta d\theta. \quad (8.7)$$

Используется также понятие *фактора накопления при отражении*, например, фактор накопления энергии при отражении определяется из соотношения

$$B_s = 1 + \cos\theta_0 \int_0^{2\pi} d\varphi \int_0^{\pi/2} a_s(E_0, \theta_0; \theta, \varphi) \text{tg}\theta d\theta = 1 + A_s(E_0, \theta_0). \quad (8.8)$$

Отметим, что при помощи преобразований можно показать, что дифференциальное спектральное альbedo плоского мононаправленного источника* совпадает с дважды дифференциальным спектральным альbedo тонкого луча, когда эффективными размерами области рассеяния на поверхности отражателя для тонкого луча можно пренебречь, или, другими словами, совпадает в этом случае с дифференциальным спектральным альbedo тонкого луча.

Отмеченная закономерность часто позволяет не разделять дифференциальные и интегральные характеристики альbedo мононаправленных точечных и плоских источников, которые рассматриваются в следующих параграфах, а классифицировать их как характеристики альbedo мононаправленных источников.

* Для плоского мононаправленного источника понятие «дважды дифференциальное спектральное альbedo» отсутствует: в силу бесконечности источника любой элемент поверхности отражателя формирует одинаковое угловое распределение обратно рассеянного излучения.

§ 8.2. АЛЬБЕДО ФОТОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Наиболее подробная информация о дифференциальном альбедо приведена в [274], где определены экспериментально и расчетно методом Монте-Карло дифференциальные спектральные, числовые, энергетические и дозовые (по экспозиционной дозе) альбедо тонкого луча с энергией фотонов источника $E_0 = 0,06; 0,10; 0,15; 0,20; 0,28; 0,66; 1,25; 2,0; 3,0; 5,0; 7,0$ и $10,0$ МэВ для основных материалов рассеивателей (воды, алюминия, железа и свинца). Рассмотрены углы падения $\theta_0 = 0; 15; 30; 45; 60; 75$ и 85° и углы отражения $\theta = 0; 15; 30; 45; 60; 75$ и 85° для φ , равного 0 и 180° . Информация для других углов $\varphi \neq 0$ или 180° может быть получена при помощи метода экономии исследований (см. с. 443).

Значения дифференциальных энергетического и дозового альбедо для энергий γ -излучения радионуклидов ^{137}Cs и ^{60}Co приведены в табл. 8.1 [274].

ФОРМЫ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК

1. Улучшенная полуэмпирическая формула. Для расчетов дифференциальных характеристик альбедо фотонного излучения от полубесконечных отражателей с максимальной погрешностью не выше 30 % рекомендуется улучшенная полуэмпирическая формула [277]. Эта формула для дифференциального токового дозового (энергетического, числового) альбедо точечного мононаправленного источника фотонов с энергией E_0 , МэВ, падающих под углом θ_0 к поверхности полубесконечного отражателя и детектируемых в направлении, определяемом углами θ и φ , имеет вид

$$A_{д(э,ч)} = \frac{d\sigma_{э(э,ч)}(E_0, \theta_s)}{d\Omega} 10^{26} + B_{д(э,ч)} [h_p(\cos\theta_0)h_p(\cos\theta) - 1] + C_{д(э,ч)}, \quad (8.9)$$

$$1 + \frac{\cos\theta_0}{\cos\theta} \sqrt{1 + \frac{E_0}{0,511}(1 - \cos\theta)}$$

где $A_{д(э,ч)}$, $B_{д(э,ч)}$, $C_{д(э,ч)}$ — коэффициенты для дозового (по экспозиционной дозе), энергетического и числового альбедо соответственно, зависящие от E_0 и материала отражателя (см. табл. 8.2); $\frac{d\sigma_{э(э,ч)}(E_0, \theta_s)}{d\Omega}$ — дифференциальное сечение комптоновского рассеяния Клейна—Нишины—Тамма в $\text{см}^2/(\text{электрон} \cdot \text{ср})$ для энергии фотона [см. табл. 5.10, формула (5.9)] при расчете дозовых и энергетических альбедо и для числа фотонов [см. табл. 5.9, формула (5.8)] при расчете числовых альбедо; $h_p(\cos\alpha)$ — функция Чандрасекара, зависящая от $\cos\alpha$ и параметра p — отношения сечения рассеяния к полному сечению, для $E_0 = 0,06 \div 10$ МэВ и всех рассмотренных материалов отражателей можно

Таблица 8.1

Дифференциальные токовые альбедо фотонного излучения тонкого луча с энергией фотонов радионуклидов ^{137}Cs ($E_0 = 0,662$ МэВ) и ^{60}Co ($E_0 = 1,25$ МэВ) для полубесконечных рассеивателей из различных материалов $a_s(E_0, \theta_0; \theta, \varphi)$, 10^{-4} и $a_d(E_0, \theta_0; \theta, \varphi)$, 10^{-4}

Вид альбедо	E_0 , МэВ	θ_0 , град	$\varphi = 0^\circ$ для θ , град						$\varphi = 180^\circ$ для θ , град						
			0	15	30	45	60	75	85	0	15	30	45	60	75
Энергетическое альбедо	0,66	0	214	208	190	159	123	69,7	22,5	221	194	168	121	62,0	21,0
		30	225	228	224	220	174	117	48,0	285	253	180	151	86,0	35,0
		60	306	330	358	396	444	433	240	335	300	255	243	163	80,0
	1,25	85	384	464	649	935	1473	1996	1587	187	176	156	109	74,0	32,5
		0	91,8	89,8	84,0	77,0	56,6	30,8	11,0	101	90,1	83,0	61,2	32,0	9,2
		30	105	119	116	137	112	65,7	28,6	154	125	100	72,2	37,7	12,5
Дозовое альбедо	0,66	60	170	180	210	246	308	333	210	187	176	156	109	74,0	32,0
		85	240	296	418	707	1356	2072	2031	187	176	156	109	74,0	32,0
		0	192	186	170	148	113	65,2	21,1	199	176	150	109	56,6	19,3
	1,25	30	202	206	210	201	164	113	43,8	262	231	172	125	76,0	28,0
		60	284	310	343	385	440	433	241	310	275	240	200	147	71,7
		85	360	442	590	923	1467	1988	1584	310	275	240	200	147	71,7
Энергетическое альбедо	0,66	0	95,2	93,3	87,6	81,6	60,2	32,9	12,2	105	93,1	74,0	56,0	31,9	9,8
		30	110	120	128	140	120	72,1	30,0	162	129	103	73,8	38,5	12,8
		60	181	187	227	270	338	366	226	194	186	163	110	75,0	32,5
	1,25	85	259	320	457	778	1465	2314	2057	194	186	163	110	75,0	32,5
		0	182	177	162	138	109	64,0	21,7	192	175	152	108	56,1	20,1
		30	203	204	207	198	163	112	47,0	248	225	192	146	80,0	26,5
Дозовое альбедо	0,66	60	280	312	330	388	423	419	230	248	192	146	80,0	26,5	
		85	355	435	621	903	1152	1960	1553	339	291	249	222	154	76,5
		0	182	177	162	138	109	64,0	21,7	192	175	152	108	56,1	20,1

Вид альбедо	E ₀ , МэВ	θ ₀ , град	ψ = 0° для θ, град								ψ = 180° для θ, град																		
			0		15		30		45		60		75		85		15		30		45		60		75		85		
	1,25	0	83,5	81,6	75,7	72,6	55,1	30,2	11,0	89,3	80,2	67,0	48,1	27,1	8,2	154	141	113	91,0	66,0	34,1	10,9	178	162	144	103	70,3	31,1	
		30	96,0	108	105	98,1	89,6	62,9	27,4	89,3	80,2	67,0	48,1	27,1	8,2	171	154	135	96,0	50,0	18,3	23,7	284	267	222	199	138	68,6	
		60	154	169	201	238	303	309	197	206	178	162	144	103	70,3	31,1	223	201	170	130	71,1	23,7	284	267	222	199	138	68,6	
		85	224	291	410	699	1350	2141	2026	2026	178	162	144	103	70,3	31,1	284	267	222	199	138	68,6	284	267	222	199	138	68,6	
Дозовое альбедо	0,66	0	162	157	145	123	100	59,0	20,4	11,8	89,3	80,2	67,0	48,1	27,1	171	154	135	96,0	50,0	18,3	23,7	284	267	222	199	138	68,6	
		30	181	183	190	185	153	108	42,2	30,1	89,3	80,2	67,0	48,1	27,1	171	154	135	96,0	50,0	18,3	23,7	284	267	222	199	138	68,6	
		60	258	291	310	372	392	416	230	230	171	154	135	96,0	50,0	18,3	23,7	284	267	222	199	138	68,6	284	267	222	199	138	68,6
		85	333	419	564	892	1145	1953	2242	2053	171	154	135	96,0	50,0	18,3	23,7	284	267	222	199	138	68,6	284	267	222	199	138	68,6
	1,25	0	84,2	82,3	76,9	75,5	57,7	31,7	11,8	90,1	80,8	67,3	48,6	28,1	8,5	146	146	115	91,6	66,4	34,3	11,0	187	169	150	104	71,0	31,5	
		30	97,6	112	110	104	96,4	68,7	24,5	30,1	90,1	80,8	67,3	48,6	28,1	146	146	115	91,6	66,4	34,3	11,0	187	169	150	104	71,0	31,5	
		60	162	176	216	260	322	340	213	213	146	115	91,6	66,4	34,3	11,0	187	169	150	104	71,0	31,5	187	169	150	104	71,0	31,5	
		85	240	316	449	769	1458	2242	2053	2053	187	169	150	104	71,0	31,5	2053	2053	2053	2053	2053	2053	2053	2053	2053	2053	2053	2053	2053

Материал — железо [274]

Энергетическое альбедо	0,66	0	109	104	95,6	84,3	71,3	47,2	14,7	114	104	86,4	62,4	33,5	12,2	167	148	119	90,8	49,2	16,4	238	223	186	163	121	59,2	
		30	121	136	135	137	119	95,7	43,4	14,7	114	104	86,4	62,4	33,5	12,2	167	148	119	90,8	49,2	16,4	238	223	186	163	121	59,2
		60	200	233	259	326	383	396	248	248	167	148	119	90,8	49,2	16,4	238	223	186	163	121	59,2	238	223	186	163	121	59,2
		85	294	373	558	839	1373	1917	1551	1551	238	223	186	163	121	59,2	238	223	186	163	121	59,2	238	223	186	163	121	59,2
	1,25	0	54,6	53,7	53,2	44,4	36,9	23,6	8,6	61,4	54,2	44,7	34,6	17,5	6,3	93,7	84,8	65,5	46,8	24,7	8,8	170	140	111	96,1	60,7	26,8	
		30	68,7	68,0	74,5	78,8	74,9	56,2	24,5	8,6	61,4	54,2	44,7	34,6	17,5	6,3	93,7	84,8	65,5	46,8	24,7	8,8	170	140	111	96,1	60,7	26,8
		60	114	139	167	209	265	308	201	201	93,7	84,8	65,5	46,8	24,7	8,8	170	140	111	96,1	60,7	26,8	170	140	111	96,1	60,7	26,8
		85	195	261	396	691	1313	2226	2024	2024	170	140	111	96,1	60,7	26,8	170	140	111	96,1	60,7	26,8	170	140	111	96,1	60,7	26,8

Вид альбедо	E ₀ , МэВ	θ ₀ , град	ψ = 0° для θ, град								ψ = 180° для θ, град																	
			0		15		30		45		60		75		85		15		30		45		60		75		85	
Дозовое альбедо	0,66	0	97,4	93,4	86,5	76,3	66,4	44,1	14,1	14,1	103	93,1	77,5	51,6	30,2	11,4	151	133	107	81,5	44,1	14,7	223	207	167	147	109	53,2
		30	110	124	126	130	115	94,4	43,1	14,1	103	93,1	77,5	51,6	30,2	11,4	151	133	107	81,5	44,1	14,7	223	207	167	147	109	53,2
		60	186	221	248	320	376	396	259	259	151	133	107	81,5	44,1	14,7	223	207	167	147	109	53,2	223	207	167	147	109	53,2
		85	279	361	552	863	1374	1915	1551	1551	223	207	167	147	109	53,2	223	207	167	147	109	53,2	223	207	167	147	109	53,2
	1,25	0	56,1	55,5	54,6	46,2	38,9	25,4	9,3	63,4	55,7	46,1	36,3	18,3	6,6	97,6	89,1	67,7	48,0	25,5	9,2	185	149	115	99,8	62,7	27,6	
		30	72,2	70,9	78,8	85,1	81,1	62,1	27,1	27,1	63,4	55,7	46,1	36,3	18,3	6,6	97,6	89,1	67,7	48,0	25,5	9,2	185	149	115	99,8	62,7	27,6
		60	120	150	182	231	293	339	212	212	97,6	89,1	67,7	48,0	25,5	9,2	185	149	115	99,8	62,7	27,6	185	149	115	99,8	62,7	27,6
		85	211	287	438	762	1425	2315	2017	2017	185	149	115	99,8	62,7	27,6	185	149	115	99,8	62,7	27,6	185	149	115	99,8	62,7	27,6

Материал — свинец [274, 276]

Энергетическое альбедо	0,66*1	0	10,7	10,4	9,6	9,2	9,0	6,6	2,7	11,9	11,1	8,9	6,4	3,9	1,5	33,5	33,5	33,5	33,5	33,5	33,5	33,5	33,5	33,5	33,5	33,5	33,5	33,5	
		30	13,0	14,6	18,1	20,9	22,2	22,1	22,1	12,1	11,9	11,1	8,9	6,4	3,9	1,5	45,0	45,0	45,0	45,0	45,0	45,0	45,0	45,0	45,0	45,0	45,0	45,0	45,0
		60	33,5	45,0	59,6	89,2	132	162	162	106	106	11,1	8,9	6,4	3,9	1,5	117,6	162	271	447	751	1090	906	88	55	40	26	9,7	
		85	117,6	162	271	447	751	1090	1530	1530	906	88	55	40	26	9,7	117,6	162	271	447	751	1090	1530	1530	1530	1530	1530	1530	1530
	0,66**2	0	7,8	7,5	7,0	7,1	7,5	5,8	2,4	8,7	8,2	6,5	4,7	3,0	1,2	9,7	9,7	9,7	9,7	9,7	9,7	9,7	9,7	9,7	9,7	9,7	9,7	9,7	
		30	9,7	11,4	18,5	18,5	20,5	21,2	21,2	11,9	8,7	8,2	6,5	4,7	3,0	1,2	28,2	39,8	53,8	85,2	129	160	105	8,7	6,5	4,7	3,0	1,2	
		60	28,2	39,8	53,8	85,2	129	160	105	105	18,9	14,0	11,0	8,0	4,1	1,3	99,6	144	254	432	739	1082	903	69,5	55,0	39,8	28,2	17,6	6,7
		85	99,6	144	254	432	739	1082	1530	1530	69,5	55,0	39,8	28,2	17,6	6,7	99,6	144	254	432	739	1082	1530	1530	1530	1530	1530	1530	
	1,25*1	0	4,3	4,4	4,7	4,0	5,0	3,9	1,8	5,1	4,2	3,4	3,1	2,0	0,7	7,0	7,0	7,0	7,0	7,0	7,0	7,0	7,0	7,0	7,0	7,0	7,0	7,0	
		30	7,0	8,7	11,0	14,5	18,2	17,6	10,5	10,5	4,2	3,4	3,1	2,0	0,7	20,0	27,0	49,3	78,6	127	178	144	6,7	4,4	2,3	0,9	0,9		
		60	20,0	27,0	49,3	78,6	127	178	144	144	6,7	4,4	2,3	0,9	0,9	92,0	140	227	448	943	1571	1571	60	36	20,5	10,7	3,6		
		85	92,0	140	227	448	943	1571	1571	1571	60	36	20,5	10,7	3,6	92,0	140	227	448	943	1571	1571	60	36	20,5	10,7	3,6		

Вид альbedo	E ₀ , МэВ	φ = 0° для θ, град					φ = 180° для θ, град							
		θ ₀ , град					θ ₀ , град							
		0	15	30	45	60	75	85	15	30	45	60	75	85
Дозовое альbedo	1,25*2	0	3,9	4,0	4,4	4,5	4,8	3,8	1,8	4,6	3,1	2,9	1,9	0,71
		30	6,5	8,2	10,6	14,2	18,0	17,5	10,5	13,6	6,1	4,0	2,1	0,80
		60	19,2	26,2	48,6	78,0	127	178	127	136	32,5	18,5	9,6	3,2
		85	88,7	137	224	445	941	1570	1530	56,8	43,0	39,8	28,2	17,6
		0	7,1	6,8	6,3	6,4	7,0	5,7	2,4	7,9	5,8	4,2	2,7	1,1
		30	8,5	10,3	14,1	18,1	20,2	21,0	11,8	17,1	9,9	7,2	3,7	1,2
	0,66*2	60	26,5	38,9	53,6	85,0	129	161	106	17,1	12,6	9,9	7,2	3,7
		85	99,6	144	254	432	739	1082	903	95,5	55,0	39,8	28,2	17,6
		0	3,9	4,0	4,6	4,6	5,1	4,1	2,0	4,6	3,2	2,9	2,0	0,74
		30	6,5	8,5	11,4	15,3	20,0	19,5	11,1	13,9	6,2	4,1	2,1	0,83
		60	21,3	33,2	53,0	84,3	140	195	136	60,7	46,0	34,6	21,3	10,0
		85	95,5	150	246	490	1000	1615	1580					3,5
1,25*2	0	3,9	4,0	4,6	4,6	5,1	4,1	2,0	4,6	3,2	2,9	2,0	0,74	
	30	6,5	8,5	11,4	15,3	20,0	19,5	11,1	13,9	6,2	4,1	2,1	0,83	
	60	21,3	33,2	53,0	84,3	140	195	136	60,7	46,0	34,6	21,3	10,0	
	85	95,5	150	246	490	1000	1615	1580					3,5	
	0	3,9	4,0	4,6	4,6	5,1	4,1	2,0	4,6	3,2	2,9	2,0	0,74	
	30	6,5	8,5	11,4	15,3	20,0	19,5	11,1	13,9	6,2	4,1	2,1	0,83	

*1 Расчеты с учетом флуоресцентного излучения [276].
*2 Расчеты без учета флуоресцентного излучения [274].

Коэффициенты A_{д(э,ч)}, B_{д(э,ч)}, C_{д(э,ч)} для расчетов по формуле (8.9) дифференциального токового альbedo фотонов тонкого луча для полубесконечных рассеивателей из воды, алюминия, железа и свинца, 10⁻⁴ [277]

E ₀ , МэВ	Дозовое альbedo				Энергетическое альbedo				Числовое альbedo			
	A _д	B _д	C _д	S*	A _э	B _э	C _э	S*	A _ч	B _ч	C _ч	S*
Вода												
0,06	208	2441	—	0,52	188	1210	—	0,045	196	1787	—	0,20
0,10	212	2166	—	0,45	214	1544	—	0,07	215	2792	—	0,34
0,15	228	1625	—	0,22	235	1495	—	0,18	234	3274	—	0,50
0,20	252	1261	—	0,16	263	1320	—	0,12	252	3451	—	0,39
0,28	285	934	—	0,53	300	1118	—	0,33	286	3574	—	0,43
0,66	449,8	552	—	0,54	448	646	—	0,46	445	3608	—	0,40
1,25	692	385	—	0,87	636	375	—	0,80	661	3458	—	0,57
2,0	979	275	3,8	1,40	843	268	3,03	1,10	878	3288	12	0,84
3,0	1274	224	10,6	1,42	1037	172	7,55	1,10	1151	2892	44,4	1,20
5,0	1824	186	21,2	1,39	1389	117	13,0	1,15	1575	2690	127,4	0,92
7,0	2097	168	27,4	1,38	1568	93,6	15,5	0,99	1752	2763	216,7	1,46
10,0	2565	161	34,2	—	1916	77,9	17,9	0,89	1962	3297	350	1,21
Алюминий												
0,06	135	389	—	0,58	120	188	—	0,44	130	300	—	0,32
0,10	203	771	—	0,17	196	642	—	0,13	209	1162	—	0,31
0,15	238	814	—	0,10	224	936	—	0,28	248	1863	—	0,49
0,20	262	744	—	0,15	268	888	—	0,33	280	2168	—	0,42
0,28	300	646	—	0,28	309	826	—	0,22	318	2427	—	0,49
0,66	439	474	—	0,43	441	562	—	0,40	482	2708	—	0,44
1,25	696	323	—	0,78	642	323	—	0,30	700	2575	—	0,58
2,0	930	267	7,87	1,28	834	233	6,31	0,78	943	2460	24,7	0,43
3,0	1248	239	21,0	1,23	1016	184	14,9	1,82	1170	2538	87,3	0,98
5,0	1636	228	39,3	1,14	1303	147	24,1	0,73	1563	2861	235,8	0,96
7,0	1804	222	48,1	1,20	1448	125	27,2	0,84	1538	3410	373	1,11
10,0	2004	232	54,8	1,97	1565	102	29,7	0,95	1493	4466	561	1,32
Железо												
0,06	35,7	19,22	—	0,66	30,7	4,24	—	1,10	34,3	8,45	—	0,60
0,10	86,6	17,4	—	1,34	84,2	5,53	—	1,31	96,7	68,1	—	0,74
0,15	146	33,8	—	1,28	149,6	53,0	—	1,11	170,5	245	—	1,03
0,20	193	30,9	—	2,80	195,3	88,5	—	2,04	226	397	—	1,58
0,28	262	86,0	—	2,02	277	151,5	—	1,49	321	644,9	—	1,01
0,66	466	182	—	1,07	465	233	—	0,81	554	1120	—	0,76
1,25	730	177	—	0,99	676	175	—	0,76	824	1136	—	0,91
2,0	947	166	15,2	1,48	820	136	12,4	1,27	1030	1194	48	1,14
3,0	1193	164	57,0	1,00	988	115	50,5	0,64	1214	1315	238	1,23

E_0 , кэВ	Дозовое альbedo				Энергетическое альbedo				Числовое альbedo			
	A_d	B_d	C_d	S^*	A_e	B_e	C_e	S^*	A_n	B_n	C_n	S^*
5,0	1396	258	68	1,03	1130	154	42,0	0,70	1303	2440	409	0,75
7,0	1148	290	77	1,33	1173	160,6	44	1,13	1215	3360	600	1,38
10,0	1450	309	80	1,95	1191	163	42	2,05	1037	4668	819	2,10

Свинец												
2,0	572	34	55	2,90	490	30,2	44	2,90	576	202	174	4,8
3,0	766	16	103	1,20	622	16,6	73	1,05	765	192	432	1,8
5,0	805	83	130	0,72	658	43,9	80	0,72	741	458	789	0,48
7,0	746	121	136	0,99	624	64,0	77,1	0,95	553	999	1058	1,026
10,0	694	187	114	2,10	598	95,7	59,7	2,03	435	2047	1169	7,06

* Среднеквадратическая относительная погрешность описания формулой (8.9) табличных значений дифференциальных характеристик альbedo равна $10,5\sqrt{S}$, %.

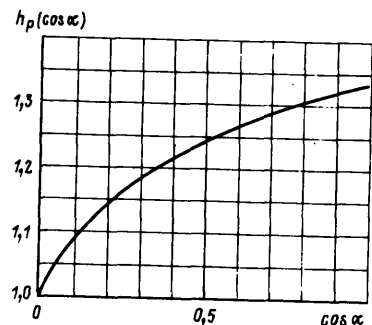


Рис. 8.2. Значение функции $h_p(\cos\alpha)$ при $p=0,6$

Пример расчета по формуле (8.9). Рассчитать a_d по экспозиционной дозе для точечного мононаправленного источника фотонов ^{60}Co ($E_0=1,25$ МэВ), падающих под углом $\theta_0=60^\circ$ на поверхность полубесконечного отражателя из алюминия, при детектировании излучения под углами $\theta=30^\circ$, $\varphi=0$.

Решение. Для предложенного примера: $\theta_s=90^\circ$; $\cos\theta_0=0,5$; $\cos\theta=0,866$; $d\sigma_s(E_0, \theta_s)/d\Omega=0,2654 \cdot 10^{-26}$ см²/ (электрон·ср) (из табл. 5.10); $h_p(\cos 60^\circ)=1,246$; $h_p(\cos 30^\circ)=1,315$ (с рис. 8.2); $A_d=696 \cdot 10^{-4}$; $B_d=323 \cdot 10^{-4}$; $C_d=0$ (из табл. 8.2).

Используя эти данные, определяем по формуле (8.9)

$$a_d = \frac{696 \cdot 10^{-4} \cdot 0,2654 \cdot 10^{-26} \cdot 10^{26} + 323 \cdot 10^{-4} [1,246 \cdot 1,315 - 1] + 0}{1 + \frac{0,5}{0,866} \sqrt{1 + \frac{1,25}{0,511} (1 - 0)}} = 0,019,$$

что с погрешностью 12% совпадает с данными расчетов методом Монте-Карло [274].

принять $p=0,6$ (см. рис. 8.2 или табл. 8.3), $h_p(\cos\alpha)$ можно оценивать также из выражения

$$h_p(\cos\alpha) = \frac{0,5773 + \cos\alpha}{0,5773 + \cos\alpha \sqrt{1 - p}};$$

θ_s — угол однократного отражения фотонов, определяется из соотношения

$$\cos\theta_s = \sin\theta_0 \sin\theta \cos\varphi - \cos\theta_0 \cos\theta, \quad (8.10)$$

В области низких энергий источников подобно формуле (8.9) предложена модифицированная формула [278]:

$$a_{d(z,\varphi)}(E_0, \theta_0; \theta) = \frac{2,52 \cdot 10^{25} A_{d(z,\varphi)} \frac{d\sigma_{d(z,\varphi)}(E_0, \theta_s)}{d\Omega} [1 + F(q)] + B_{d(z,\varphi)} [h_p(\cos\theta_0) h_p(\cos\theta) - 1]}{1 + \frac{\cos\theta_0}{\cos\theta} \sqrt{\frac{E_0}{E_{s1}}}}, \quad (8.11)$$

где $A_{d(z,\varphi)}$, $B_{d(z,\varphi)}$ — коэффициенты для дозового, энергетического и числового альbedo соответственно, зависящие от E_0 и материала отражателя (см. табл. 8.4); q — импульс, который передается при рассеянии фотона

на угол θ_s , $q=41,2 \frac{E_0}{m_0 c^2} \sin \frac{\theta_s}{2}$; $F(q)$ — атомный форм-фактор, $F(q) = Z_0 \exp\{-\alpha q \eta(q_0 - q) - [\alpha q_0 + (q - q_0) \beta] \eta(q - q_0)\}$, значения Z_0 , α , β , q_0 зависят только от материала отражателя и приведены также в табл. 8.4, $\eta(y)=1$, если $y > 0$, и равно 0, если $y \leq 0$; дифференциальные сечения $\frac{d\sigma_d(E_0, \theta_s)}{d\Omega}$ и $\frac{d\sigma_s(E_0, \theta_s)}{d\Omega}$ могут рассчитываться по формулам (5.8) и (5.9)

соответственно, а $\frac{d\sigma_d(E_0, \theta_s)}{d\Omega} = \frac{d\sigma_s(E_0, \theta_s)}{d\Omega} \frac{\mu_{en}^{возд}(E_{s1})}{\mu_{en}^{возд}(E_0)}$, $\mu_{en}^{возд}$ — коэффициент

поглощения энергии фотонов в воздухе; при расчете в функции Чандraseкара p следует принимать, как и в формуле (8.9), равным 0,6.

Средняя относительная погрешность представления данных формулой (8.11) 3—9% для $Z \leq 13$ и 3—17% для больших Z , максимальная относительная погрешность не превышает 35%. Приведенные данные позволяют получать экспоненциальной интерполяцией альbedo для веществ с любым Z с погрешностью не более 3—5%. Исключение составляют область малой энергии 20—50 кэВ для $Z=17-18$ и область малого угла $\theta_s=10 \div 15^\circ$, где погрешность за счет экспоненциальной интерполяции может достигать 20—30%.

Для получения характеристики альbedo для сложных по химическому составу веществ рекомендуется интерполяция по эффективному атомному номеру $Z_{эф}$ [278]: для сложного вещества вычисляют отношение сечения рассеяния к полному сечению взаимодействия Σ_s/Σ и с использованием зависимости, построенной для простых веществ (рис. 8.3), определяют $Z_{эф}$.

2. **Метод экономии исследований** [274, 279] предназначен для того, чтобы определить дифференциальные характеристики альbedo от полубесконечных отражателей для произвольного угла падения θ_0 и любых углов детектирования θ и φ по известной информации о дифференциальном альbedo в плоскости $\varphi=0$ или 180° (плоскость, проходящая через падающий луч и нормаль к поверхности в точке падения луча на плоскость) (см. рис. 8.1, б). Иными словами, в этом методе показано, что произвольному набору углов $(\theta_0, \theta, \varphi)$ всегда соответствует такой набор углов $(\theta'_0, \theta', \varphi'=0$ или $180^\circ)$, для которых дифференциальные альbedo совпадают с погрешностью примерно до 15% для числовых, энергетиче-

Значения функции $h_p(\cos\alpha)$

cos α	$p = \frac{\Sigma_s}{\Sigma}$						
	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7
0	1,00000	1,00000	1,00000	1,00000	1,00000	1,00000	1,00000
0,05	1,00783	1,01608	1,02484	1,03422	1,04439	1,05544	1,06780
0,10	1,01238	1,02562	1,03989	1,05535	1,07241	1,09137	1,11306
0,15	1,01584	1,03295	1,05155	1,07196	1,09574	1,12045	1,15036
0,20	1,01864	1,03892	1,06115	1,08577	1,11349	1,14517	1,18253
0,25	1,02099	1,04396	1,06930	1,09758	1,12968	1,16674	1,21095
0,30	1,02300	1,04829	1,07637	1,10789	1,14391	1,18587	1,23643
0,35	1,02475	1,05209	1,08259	1,11700	1,15659	1,20304	1,25951
0,40	1,02630	1,05546	1,08811	1,12516	1,16800	1,21861	1,28063
0,45	1,02768	1,05847	1,09308	1,13251	1,17833	1,23280	1,30003
0,50	1,02892	1,06117	1,09756	1,13918	1,18776	1,24581	1,31796
0,55	1,03004	1,06363	1,10164	1,14528	1,19640	1,25781	1,33459
0,60	1,03106	1,06587	1,10538	1,15087	1,20436	1,26893	1,35009
0,65	1,03199	1,06793	1,10881	1,15602	1,21173	1,27925	1,36457
0,70	1,03284	1,06982	1,11198	1,16080	1,21858	1,28888	1,37815
0,75	1,03363	1,07157	1,11491	1,16523	1,22495	1,29788	1,39090
0,80	1,03463	1,07319	1,11763	1,16935	1,23091	1,30631	1,40291
0,85	1,03504	1,07469	1,12017	1,17320	1,23648	1,31424	1,41425
0,90	1,03567	1,07610	1,12254	1,17681	1,24171	1,32171	1,42497
0,95	1,03626	1,07741	1,12476	1,18019	1,24664	1,32875	1,43512
1,00	1,03682	1,07864	1,12685	1,18337	1,25128	1,33541	1,44476

Таблица 8.3

							cos α
0,8	0,85	0,9	0,925	0,950	0,975	1,0	
1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	0
1,0820	1,0903	1,0999	1,1053	1,1117	1,1196	1,1368	0,05
1,1388	1,1541	1,1722	1,1828	1,1952	1,2111	1,2472	0,10
1,1866	1,2086	1,2349	1,2506	1,2693	1,2936	1,3508	0,15
1,2286	1,2570	1,2914	1,3123	1,3373	1,3703	1,4503	0,20
1,2663	1,3009	1,3433	1,3692	1,4008	1,4427	1,5473	0,25
1,3006	1,3411	1,3914	1,4224	1,4604	1,5117	1,6425	0,30
1,3320	1,3783	1,4363	1,4724	1,5170	1,5778	1,7364	0,35
1,3611	1,4129	1,4785	1,5197	1,5709	1,6414	1,8293	0,40
1,3881	1,4453	1,5183	1,5646	1,6224	1,7027	1,9213	0,45
1,4132	1,4758	1,5560	1,6073	1,6718	1,7621	2,0128	0,50
1,4368	1,5044	1,5918	1,6480	1,7191	1,8195	2,1037	0,55
1,4590	1,5315	1,6259	1,6869	1,7647	1,8753	2,1941	0,60
1,4798	1,5571	1,6583	2,7242	1,8086	1,9295	2,2842	0,65
1,4995	1,5814	1,6893	1,7600	1,8509	1,9822	2,3740	0,70
1,5182	1,6045	1,7190	1,7943	1,8918	2,0334	2,4635	0,75
1,5358	1,6265	1,7474	1,8274	1,9313	2,0833	2,5527	0,80
1,5526	1,6475	1,7746	1,8592	1,9695	2,1320	2,6417	0,85
1,5685	1,6675	1,8008	1,8898	2,0065	2,1795	2,7306	0,90
1,5837	1,6867	1,8259	1,9194	2,0423	2,2258	2,8193	0,95
1,5982	1,7050	1,8501	1,9479	2,0771	2,2710	2,9078	1,00

ческих и дозовых характеристик и с погрешностью внутри отдельного энергетического интервала не более 25% для спектрального альbedo.

Углы θ'_0 и θ' при этом определяют по формулам:

$$\cos\theta'_0 = \cos\theta_0 \sqrt{1 + \frac{\text{tg}^2\theta \text{tg}^2\theta_0 \sin^2\varphi}{\text{tg}^2\theta + 2\text{tg}\theta_0 \text{tg}\theta \cos\varphi + \text{tg}^2\theta_0}}; \quad (8.12)$$

$$\cos\theta' = \cos\theta \sqrt{1 + \frac{\text{tg}^2\theta \text{tg}^2\theta_0 \sin^2\varphi}{\text{tg}^2\theta + 2\text{tg}\theta_0 \text{tg}\theta \cos\varphi + \text{tg}^2\theta_0}}. \quad (8.13)$$

3. Четырехгрупповое или двухгрупповое представление дифференциального спектрального альbedo [274]. Для оценок спектра отраженного излучения можно представить в виде четырех групп. Примем следующие обозначения для групп: а) N_{s_1} — число однократно рассеянных фотонов с энергией $E_{s_1} = \frac{0,511}{0,511/E_0 + (1 - \cos\theta_s)}$, МэВ, однократного рассеяния на данный угол θ_s , определяемый формулой (8.10); E_0 — энергия источника, МэВ; б) N_{s_m} — число многократно ($m \geq 2$) рассеянных фотонов, распределенных по числу фотонов равномерно в энергетическом интервале от энергий вблизи E_{s_1} до минимальных энергий в спектре

$E_{\text{мин}}$ [этой группе фотонов приписывается средняя энергия $(E_{s_1} + E_{\text{мин}})/2$]; $E_{\text{мин}}$ может быть принята равной 0,03; 0,05; 0,08 и 0,2 МэВ для воды, алюминия, железа и свинца соответственно; в) $N_0^{\text{анн}}$ — число нерассеянных аннигиляционных фотонов с энергией $E_0 = 0,511$ МэВ; г) $N_s^{\text{анн}}$ — число рассеянных в отражателе аннигиляционных фотонов, распределенных равномерно в энергетическом диапазоне от энергии $E_0 = 0,511$ МэВ до $E_{\text{мин}}$ [этой группе фотонов приписывается средняя энергия $(0,511 + E_{\text{мин}})/2$].

Величины N_{s_1} , N_{s_m} , $N_0^{\text{анн}}$, $N_s^{\text{анн}}$ можно определить из следующей системы четырех уравнений:

$$N_{s_1} + N_{s_m} = a'_4(E_0, \theta_0; \theta, \varphi); \quad (8.14)$$

$$N_{s_1} E_{s_1} + N_{s_m} (E_{s_1} + E_{\text{мин}})/2 = E_0 a'_3(E_0, \theta_0; \theta, \varphi); \quad (8.15)$$

$$N_0^{\text{анн}} + N_s^{\text{анн}} = a_4(E_0, \theta_0; \theta, \varphi) - a'_4(E_0, \theta_0; \theta, \varphi); \quad (8.16)$$

$$N_0^{\text{анн}} \cdot 0,511 + N_s^{\text{анн}} \cdot (0,511 + E_{\text{мин}})/2 = E_0 [a_3(E_0, \theta_0; \theta, \varphi) - a'_3(E_0, \theta_0; \theta, \varphi)], \quad (8.17)$$

где a'_4 , a'_3 — дифференциальное числовое и энергетическое альbedo соответственно без учета аннигиляционного излучения, приведены в табл. 3.4 и 3.5 работы [274].

Таблица 8.4

Коэффициенты $A_{д(э,ч)}$, $B_{д(э,ч)}$ для расчетов по формуле (8.11) дифференциального токового альbedo фотонов тонкого луча для полубесконечных рассеивателей [278]

E_0 , кэВ	Числовое альbedo		Энергетическое альbedo		Дозовое альbedo	
	$A_ч$	$B_ч$	$A_э$	$B_э$	$A_д$	$B_д$
Бериллий ($Z_0=4$; $\alpha=5,28$; $\beta=2,59$; $q_0=0,339$)						
20	4,28—2* ¹	1,28—1	4,26—2	1,13—1	4,34—2	1,87—1
30	5,58—2	2,19—1	5,54—2	1,85—1	5,72—2	4,01—1
40	6,26—2	2,75—1	6,21—2	2,22—1	6,37—2	4,79—1
50	6,73—2	3,06—1	6,68—2	2,36—1	6,80—2	4,88—1
60	7,06—2	3,29—1	7,00—2	2,43—1	7,11—2	4,66—1
75	7,48—2	3,52—1	7,42—2	2,46—1	7,48—2	3,95—1
100	8,06—2	3,77—1	7,98—2	2,43—1	8,02—2	3,10—1
150	9,05—2	4,05—1	8,95—2	2,27—1	8,94—2	2,30—1
200	9,89—2	4,15—1	9,78—2	2,14—1	9,76—2	1,94—1
280	1,11—1	4,26—1	1,10—1	1,92—1	1,09—1	1,70—1
Углерод ($Z_0=6$; $\alpha=4,13$; $\beta=1,89$; $q_0=0,685$)						
20	2,29—2	3,22—2	2,29—2	2,86—2	2,32—2	4,67—2
30	3,92—2	9,91—2	3,87—2	8,41—2	4,13—2	1,77—1
40	5,15—2	1,65—1	5,05—2	1,33—1	5,38—2	2,74—1
50	5,98—2	2,09—1	5,87—2	1,62—1	6,14—2	3,31—1
60	6,53—2	2,41—1	6,41—2	1,77—1	6,62—2	3,44—1
75	7,13—2	2,73—1	7,03—2	1,91—1	7,13—2	3,01—1
100	7,92—2	3,03—1	7,84—2	2,00—1	7,87—2	2,53—1
150	8,95—2	3,29—1	8,84—2	1,89—1	8,84—2	1,90—1
200	9,83—2	3,38—1	9,72—2	1,71—1	9,70—2	1,58—1
280	1,10—1	3,42—1	1,90—1	1,56—1	1,08—1	1,38—1
Вода ($Z_0=6,6^2$; $\alpha=3,47$; $\beta=1,52$; $q_0=1,03$)						
20	1,44—2	1,41—2	1,44—2	1,27—2	1,43—2	2,00—2
30	2,93—2	4,86—2	2,91—2	4,13—2	3,00—2	8,64—2
40	4,17—2	1,02—1	4,05—2	8,21—2	4,37—2	1,69—1
50	5,13—2	1,44—1	4,99—2	1,12—1	5,33—2	2,27—1
60	5,88—2	1,76—1	5,72—2	1,33—1	6,02—2	2,42—1
75	6,68—2	2,09—1	6,52—2	1,47—1	6,67—2	2,29—1
100	7,64—2	2,47—1	7,51—2	1,60—1	7,56—2	2,06—1
150	8,89—2	2,92—1	8,80—2	1,66—1	8,79—2	1,70—1
200	9,77—2	3,08—1	9,67—2	1,60—1	9,66—2	1,48—1
280	1,10—1	3,20—1	1,09—1	1,48—1	1,08—1	1,31—1
Алюминий ($Z_0=13$; $\alpha=3,28$; $\beta=0,998$; $q_0=1,21$)						
20	2,90—3	6,58—4	2,94—3	5,79—4	2,77—3	9,81—4
30	8,65—3	3,49—3	8,77—3	2,91—3	8,26—3	6,48—3
40	1,78—2	1,35—2	1,80—2	1,07—2	1,75—2	2,31—2

Продолжение табл. 8.4

E_0 , кэВ	Числовое альbedo		Энергетическое альbedo		Дозовое альbedo	
	$A_ч$	$B_ч$	$A_э$	$B_э$	$A_д$	$B_д$
50	2,82—2	3,07—2	2,84—2	2,32—2	2,80—2	4,98—2
60	3,79—2	5,04—2	3,80—2	3,65—2	3,77—2	7,00—2
75	4,91—2	7,90—2	4,93—2	5,28—2	4,91—2	8,90—2
100	6,41—2	1,21—1	6,42—2	7,58—2	6,41—2	1,01—1
150	8,28—2	1,74—1	8,28—2	9,39—2	8,28—2	9,56—2
200	9,46—2	1,97—1	9,46—2	9,41—2	9,46—2	8,66—2
280	1,09—1	2,19—1	1,09—1	8,90—2	1,09—1	7,69—2
Титан ($Z_0=22$; $\alpha=3,19$; $\beta=1,65$; $q_0=0,680$)						
20	6,22—4	8,55—5	6,38—4	7,54—5	5,53—4	1,27—4
30	1,84—3	2,17—4	1,87—3	1,81—4	1,68—3	4,02—4
40	4,26—3	9,16—4	4,32—3	7,27—4	4,09—3	1,56—3
50	7,96—3	2,31—3	8,07—3	1,75—3	7,79—3	3,74—3
60	1,25—2	4,04—3	1,27—2	2,94—3	1,23—2	5,83—3
75	1,94—2	9,81—3	1,97—2	6,70—3	1,94—2	1,09—2
100	3,29—2	2,31—2	3,34—2	1,45—2	3,31—2	1,92—2
150	5,75—2	5,56—2	5,80—2	3,02—2	5,81—2	3,06—2
200	7,33—2	8,00—2	7,41—2	3,83—2	7,43—2	3,52—2
280	9,29—2	1,08—1	9,40—2	4,40—2	9,42—2	3,81—2
Железо ($Z_0=26$; $\alpha=2,82$; $\beta=1,45$; $q_0=0,924$)						
20	4,08—4	9,22—5	4,23—4	8,12—5	3,59—4	1,38—4
30	1,17—3	1,41—4	1,21—3	1,17—4	1,04—3	2,62—4
40	2,62—3	3,29—4	2,68—3	2,61—4	2,50—3	5,61—4
50	4,95—3	7,50—4	5,04—3	5,69—4	4,84—3	1,21—3
60	7,95—3	2,07—3	8,10—3	1,50—3	7,84—3	2,39—3
75	1,29—2	4,48—3	1,31—2	3,06—3	1,29—2	4,98—3
100	2,34—2	1,15—2	2,39—2	7,23—3	2,37—2	9,57—3
150	4,58—2	3,15—2	4,66—2	1,71—2	4,66—2	1,73—2
200	6,21—2	5,00—2	6,33—2	2,40—2	6,36—2	2,21—2
280	8,27—2	7,53—2	8,44—2	3,09—2	8,48—2	2,67—2
Цинк ($Z_0=30$; $\alpha=2,55$; $\beta=1,26$; $q_0=1,18$)						
20	2,74—4	2,31—5	2,84—4	2,04—5	2,39—4	3,45—5
30	8,04—4	7,70—5	8,35—4	6,42—5	6,96—4	1,43—4
40	1,74—3	2,15—4	1,79—3	1,70—4	1,64—3	3,66—4
50	3,25—3	5,12—4	3,32—3	3,87—4	3,17—3	8,29—4
60	5,30—3	1,02—3	5,40—3	7,02—4	5,22—3	1,48—3
75	8,80—3	2,13—3	8,96—3	1,46—3	8,81—3	2,37—3
100	1,69—2	5,68—3	1,72—2	3,57—3	1,70—2	4,72—3
150	3,59—2	1,80—2	3,66—2	9,65—3	3,67—2	9,66—3
200	5,10—2	3,07—2	5,23—2	1,48—2	5,27—2	1,36—2
280	7,21—2	5,19—2	7,42—2	2,14—2	7,48—2	1,85—2

*¹ Читать как $4,28 \cdot 10^{-2}$.*² $Z_{эф}=7,6$ следует использовать для интерполяции в диапазоне $7,6 \leq Z \leq 13$; $Z_{эф}$ не совпадает с Z_0 .

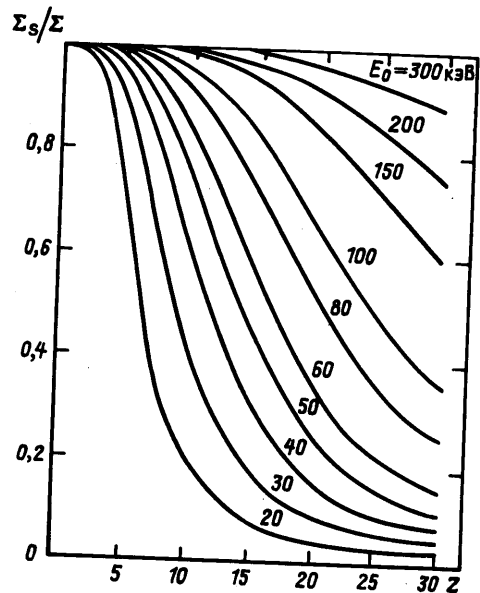


Рис. 8.3. Зависимость отношения сечения рассеяния к полному сечению от атомного номера отражателя для различных энергий источника

При энергиях $E_0 \lesssim 2$ МэВ аннигиляционное излучение может не учитываться и спектр можно представить в виде двух групп, решая систему уравнений (8.14) и (8.15).

Для построения гистограммы спектра величины N_{s1} , N_{sm} , $N_s^{\text{анн}}$ нормируют на единичный энергетический интеграл.

ИНТЕГРАЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Интегральные характеристики можно рассчитывать, исходя из данных о дифференциальном альбедо, по формулам, подобным (8.5) или (8.7).

Интегральные характеристики альбедо приведены в табл. 8.5—8.8. Для тяжелых рассеивателей (свинец) приводятся значения альбедо, рассчитанные без учета [280] и с учетом [281] флуоресцентного излучения. Неучет флуоресцентного излучения в данных таблиц для других отражателей может привести к погрешностям, заключенным в пределах погрешностей определения значений альбедо и не превышающим нескольких процентов.

В табл. 8.9 приводятся факторы накопления энергии при отражении.

Рассмотрим некоторые зависимости для интегральных характеристик альбедо.

А. Энергетическое токовое альбедо для узкого пучка фотонов с энергией $0,2 \text{ МэВ} \lesssim E_0 \lesssim 2,0 \text{ МэВ}$, падающих под углом $\theta_0 < 80^\circ$ на полубесконечный рассеиватель из материала с атомным номером Z и плотностью ρ , г/см³, можно оценить по формулам [282]:

$$a_s(E_0, \theta_0) = 3,2 \frac{\rho}{E_0 \cos \theta_0 Z^2} \text{ при } 6 < Z < 50; \quad (8.18)$$

$$a_s(E_0, \theta_0) = 3,2 \frac{\rho}{E_0 \cos^2 \theta_0 Z^2} \text{ при } Z > 50. \quad (8.19)$$

Таблица 8.5
Интегральное токовое числовое альбедо фотонного излучения мононаправленного источника с энергией E_0 , падающего под углом θ_0 на полубесконечные рассеиватели из различных материалов [280, 281]

θ_0 , град	E_0 , МэВ							
	0,02	0,05	0,1	0,2	0,5	1,0	1,25	2,0
Водород ($Z=1$)								
0	0,685	0,725	0,697	0,657	0,597	0,503	—	0,316
30	0,707	0,733	0,712	0,697	0,650	0,539	—	0,362
60	0,780	0,799	0,768	0,777	0,735	0,658	—	0,527
90	0,889	0,903	0,873	0,909	0,899	0,867	—	0,849
Вода ($Z_{\text{эф}}=7,5$)								
0	0,050	0,276	0,391	0,425	0,358	0,289	0,257	0,222
30	0,050	0,297	0,418	0,453	0,391	0,324	0,291	0,257
60	0,062	0,372	0,520	0,559	0,508	0,458	0,414	0,390
90	0,146	0,611	0,746	0,788	0,782	0,778	0,764	0,772
Бетон¹ ($Z_{\text{эф}}=13,4$)								
0	0,008	0,076	0,213	0,285	0,268	0,221	0,209	0,162
30	0,009	0,083	0,233	0,310	0,296	0,256	0,235	0,188
60	0,012	0,116	0,310	0,409	0,414	0,390	0,352	0,313
90	0,029	0,267	0,574	0,703	0,734	0,744	0,722	0,724
Железо ($Z=26$)								
0	—	—	0,042	0,106	0,149	0,141	—	0,097
30	—	—	0,046	0,121	0,172	0,166	—	0,125
60	—	—	0,072	0,189	0,269	0,266	—	0,224
90	—	—	0,214	0,488	0,628	0,662	—	0,659
Свинец² ($Z=82$)								
0	—	—	—	0,005	0,009	0,014	—	—
30	—	—	—	0,006	0,012	0,020	—	—
60	—	—	—	0,012	0,034	0,059	—	—
90	—	—	—	0,055	0,243	0,397	—	—

θ_0 , град	E_0 , МэВ							
	0,02	0,05	0,1	0,2	0,5	1,0	1,25	2,0
Свинец*³ (Z=82)								
0	—	—	0,270	0,086* ⁴	0,030	0,020	—	0,030
30	—	—	0,281	0,110* ⁴	0,056	0,023	—	0,045
60	—	—	0,314	0,135* ⁴	0,066	0,068	—	0,094
85	—	—	0,360	0,290* ⁴	0,247	0,283	—	0,339
Свинец*⁵ (Z=82)								
0	—	—	0,265	0,081* ⁴	0,020	0,007	—	0,003
30	—	—	0,276	0,102* ⁴	0,025	0,007	—	0,004
60	—	—	0,307	0,123* ⁴	0,034	0,012	—	0,007
85	—	—	0,352	0,189* ⁴	0,108	0,049	—	0,022

*¹ Состав бетона (% по массе): Н — 0,56; О — 49,56; Si — 31,35; Al — 4,56; Са — 8,26; Fe — 1,22; Mg — 0,24; Na — 1,71; К — 1,92; S — 0,12.

*² Расчеты альbedo без учета флуоресцентного излучения [280].

*³ Расчеты альbedo с учетом флуоресцентного излучения [281].

*⁴ Приводится для $E_0=0,25$ МэВ.

*⁵ Расчеты альbedo только от флуоресцентного излучения [281].

Таблица 8.6

Интегральное токовое энергетическое альbedo фотонного излучения мононаправленного источника с энергией E_0 , падающего под углом θ_0 на полубесконечные рассеиватели из разных материалов [280, 281]

θ_0 , град	E_0 , МэВ							
	0,02	0,05	0,1	0,2	0,5	1,0	1,25	2,0
Водород (Z=1)								
0	0,563	0,465	0,351	0,232	0,110	0,053	—	0,016
30	0,582	0,470	0,363	0,254	0,126	0,059	—	0,021
60	0,659	0,547	0,443	0,330	0,190	0,107	—	0,049
90	0,803	0,727	0,627	0,560	0,424	0,336	—	0,282
Вода (Z_{эф}=7,5)								
0	0,047	0,227	0,257	0,203	0,099	0,046	0,034	0,019
30	0,047	0,245	0,276	0,222	0,113	0,055	0,048	0,024
60	0,058	0,312	0,359	0,296	0,172	0,103	0,078	0,050
90	0,140	0,541	0,586	0,528	0,419	0,335	0,313	0,270
Бетон*¹ (Z_{эф}=13,4)								
0	0,008	0,065	0,153	0,154	0,085	0,041	0,033	0,017
30	0,008	0,072	0,170	0,170	0,097	0,051	0,038	0,021
60	0,012	0,102	0,235	0,242	0,160	0,098	0,074	0,048
90	0,028	0,243	0,473	0,500	0,413	0,348	0,308	0,266

θ_0 , град	E_0 , МэВ							
	0,02	0,05	0,1	0,2	0,5	1,0	1,25	2,0
Железо (Z=26)								
0	—	—	0,032	0,063	0,054	0,031	—	0,012
30	—	—	0,035	0,074	0,065	0,039	—	0,017
60	—	—	0,057	0,125	0,119	0,079	—	0,041
90	—	—	0,183	0,370	0,378	0,327	—	0,263
Свинец*² (Z=82)								
0	—	—	—	0,003	0,004	0,004	—	—
30	—	—	—	0,004	0,005	0,006	—	—
60	—	—	—	0,008	0,018	0,024	—	—
90	—	—	—	0,043	0,159	0,214	—	—
Свинец*³ (Z=82)								
0	—	—	0,236	0,031* ⁴	0,007	0,004	—	0,006
30	—	—	0,246	0,041* ⁴	0,012	0,005	—	0,010
60	—	—	0,274	0,051* ⁴	0,023	0,024	—	0,024
85	—	—	0,314	0,120* ⁴	0,110	0,134	—	0,123
Свинец*⁵ (Z=82)								
0	—	—	0,232	0,028* ⁴	0,003	0,0006	—	0,0001
30	—	—	0,242	0,036* ⁴	0,004	0,0007	—	0,0002
60	—	—	0,268	0,043* ⁴	0,006	0,0011	—	0,0003
85	—	—	0,308	0,066* ⁴	0,019	0,0043	—	0,0010

*¹ Состав бетона указан в табл. 8.5 (в сноске 1).

*² Расчеты альbedo без учета флуоресцентного излучения [280].

*³ Расчеты альbedo с учетом флуоресцентного излучения [281].

*⁴ Приводится для $E_0=0,25$ МэВ.

*⁵ Расчеты альbedo только от флуоресцентного излучения [281].

Таблица 8.7

Интегральное токовое дозовое альbedo фотонного излучения мононаправленного источника с энергией E_0 , падающего под углом θ_0 на полубесконечный рассеиватель из бетона (Z=13,4) [280]

θ_0 , град	E_0 , МэВ			
	0,2	0,5	1,0	2,0
0	0,138	0,074	0,040	0,020
25	0,148	0,083	0,045	0,023
45	0,173	0,103	0,061	0,036
60	0,220	0,146	0,099	0,055
73	0,283	0,205	0,155	0,099
84	0,390	0,309	0,263	0,193
90	0,470	0,395	0,355	0,304

Таблица 8.8

Потоковое дозовое интегральное альbedo A_d для моноэнергетических источников с энергией E_0 при углах падения θ_0 для бесконечных отражателей из разных материалов*

E_0 , МэВ	Угол падения, град				
	0	45	60	75	85
Вода					
0,06	0,804	0,735	0,668	0,501	0,258
0,10	0,666	0,646	0,606	0,471	0,250
0,15	0,496	0,525	0,521	0,436	0,246
0,20	0,388	0,449	0,473	0,425	0,253
0,28	0,286	0,372	0,424	0,418	0,266
0,66	0,142	0,248	0,354	0,459	0,351
1,25	0,0798	0,170	0,291	0,498	0,460
2,0	0,0486	0,118	0,232	0,508	0,566
3,0	0,0331	0,0820	0,175	0,472	0,640
5,0	0,0221	0,0517	0,116	0,403	0,740
7,0	0,0172	0,0359	0,0782	0,311	0,721
10,0	0,0142	0,0263	0,0537	0,235	0,720
Алюминий					
0,06	0,262	0,266	0,271	0,235	0,137
0,10	0,363	0,392	0,404	0,353	0,207
0,15	0,339	0,398	0,427	0,389	0,235
0,20	0,293	0,372	0,417	0,399	0,249
0,28	0,238	0,337	0,403	0,414	0,271
0,66	0,128	0,233	0,338	0,443	0,341
1,25	0,0720	0,162	0,286	0,496	0,461
2,0	0,0477	0,114	0,223	0,484	0,538
3,0	0,0361	0,0847	0,176	0,466	0,628
5,0	0,0275	0,0555	0,113	0,396	0,668
7,0	0,0230	0,0409	0,0775	0,276	0,625
10,0	0,0202	0,0317	0,0535	0,194	0,568
Железо					
0,06	0,0512	0,0556	0,0603	0,0557	0,0342
0,10	0,0895	0,113	0,130	0,127	0,0803
0,15	0,113	0,165	0,200	0,204	0,132
0,20	0,114	0,187	0,239	0,256	0,170
0,28	0,119	0,216	0,290	0,326	0,226
0,66	0,0866	0,200	0,319	0,447	0,354
1,25	0,0546	0,149	0,282	0,509	0,480
2,0	0,0384	0,105	0,218	0,487	0,546
3,0	0,0350	0,0826	0,170	0,449	0,604
5,0	0,0333	0,0593	0,108	0,326	0,576
7,0	0,0308	0,0478	0,0775	0,235	0,509
10,0	0,0270	0,0381	0,0545	0,155	0,419

* Таблица рассчитана Р. Х. Нагаевым по данным о дифференциальных характеристиках альbedo.

Таблица 8.9

Факторы накопления энергии при отражении фотонов мононаправленного источника, падающих на полубесконечный рассеиватель под углом θ_0 .

E_0 , МэВ	$\theta_0 = 0^\circ$					$\theta_0 = 60^\circ$
	Вода	Алюминий	Бетон	Железо	Свинец	Вода
0,41	1,24	1,235	—	1,20	—	1,278
0,66	1,15	1,157	1,16	1,12	1,026	1,189
1,00	1,081	—	1,093	1,061	1,009	1,153
1,25	—	1,085	1,065	1,075	1,012	—
4,0	1,012	—	1,020	1,011	1,001	1,035
10,0	1,002	—	1,011	—	—	1,007

Таблица 8.10

Значения константы $k(E_0, \theta_0, \varphi)$

φ , град	$E_0 = 0,662$ МэВ			$E_0 = 1,25$ МэВ		
	$\theta_0 = 0^\circ$	$\theta_0 = 30^\circ$	$\theta_0 = 60^\circ$	$\theta_0 = 0^\circ$	$\theta_0 = 30^\circ$	$\theta_0 = 60^\circ$
0	0,182	0,141	0,106	0,082	0,056	0,033
30	0,182	0,168	0,145	0,082	0,070	0,059
60	0,182	0,237	0,283	0,082	0,103	0,174
90	0,182	0,276	0,418	0,082	0,108	0,249
120	0,182	0,329	0,482	0,082	0,119	0,341
150	0,182	0,345	0,510	0,082	0,131	0,419
180	0,182	0,345	0,510	0,082	0,131	0,419

Б. Количество энергии фотонного излучения тонкого луча, обратно-рассеянной через поверхность, ограниченную кривой равной интенсивности, определяют из соотношения [283]

$$\frac{I_{\text{рас}}(r)}{I_{\text{полн}}} = 1 - \exp[-k(E_0, \theta_0, \varphi)r], \quad (8.20)$$

где $I_{\text{рас}}(r)$ — энергия фотонного излучения, обратно рассеянная через поверхность, ограниченную кривой равной интенсивности; $I_{\text{полн}}$ — полная интенсивность обратно рассеянного излучения, $k(E_0, \theta_0, \varphi)$ — константа, приведенная в табл. 8.10.

Уравнение кривой равной интенсивности, ограничивающей поверхность, через которую обратно рассеивается доля интенсивности $I_{рас}(r)/I_{полн} = const$, имеет вид

$$r(\varphi) = -\ln\left(1 - \frac{I_{рас}(r)}{I_{полн}}\right) \frac{1}{k(E_0, \theta_0, \varphi)}. \quad (8.21)$$

В. Зависимость интегрального альbedo мононаправленного источника от толщины отражателя d (рис. 8.4) описывается выражением [274]

$$a_3(E_0, \theta_0, d) = a_3(E_0, \theta_0, d = \infty) [1 - \exp(-d/(q_3 \cos \theta_0))]. \quad (8.22)$$

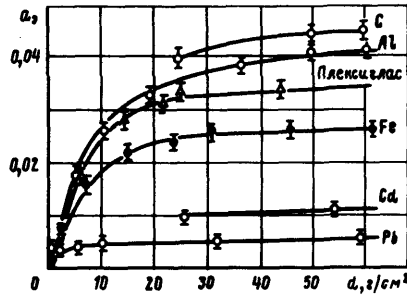


Рис. 8.4. Зависимость интегрального токового энергетического альbedo от толщины рассеивателей из различных материалов при нормальном падении γ -излучения ^{60}Co на отражатели

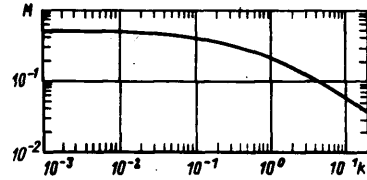


Рис. 8.5. График функции $M(k)$

Из измерений при $\theta_0 = 0^\circ$ установлено: для отражателей с $Z \lesssim 26$ $q_3 \approx 1/(2\mu)$; для тяжелых рассеивателей $q_3 \approx 1/(6\mu)$, где μ — коэффициент ослабления фотонов источника в материале рассеивателя.

Г. Величина энергетического потокового альbedo тонкого луча фотонов, падающих нормально на поверхность сферического вогнутого отражателя с бесконечно толстой стенкой из бетона радиусом R , $A_3(R)$ связана с подобной величиной для полубесконечного отражателя $A_3(\infty)$ соотношением [284]

$$\frac{A_3(\infty) - A_3(R)}{A_3(\infty)} = \frac{2kM(k)}{\ln(1 + \mu/\mu_{en1})} \quad (8.23)$$

где $k = \mu/(\mu_{en1}^2 2R)$; μ_{en1} — коэффициент поглощения энергии фотонов первого соударения в материале рассеивателя; функция $M(k)$ приведена на рис. 8.5.

Расчеты можно провести также следующим способом. Интегральное потоковое энергетическое альbedo тонкого луча фотонов, падающих нормально на поверхность вогнутого сферического или цилиндрического отражателя с бесконечно толстой стенкой, $A_3(\mu R)$ как функция μR связана с $A_3(\mu R = \infty)$ для легких рассеивателей соотношением [285]

$$\frac{A_3(\mu R)}{A_3(\mu R = \infty)} = 1 - \exp\left[-(0,37 + 0,25\sqrt{E_0})(\mu R)^n\right]. \quad (8.24)$$

Таблица 8.11

Дифференциальное и интегральное альbedo мононаправленных источников тепловых нейтронов, падающих под углом θ_0 на полубесконечные отражатели. (Значения числовых, энергетических и дозовых альbedo тепловых нейтронов совпадают между собой и обозначаются $a(E_T, \theta_0; \theta, \varphi)$)

Авторы и предпосылки	Формулы		Литература
	Дифференциальное альbedo	Интегральное альbedo	
Формула Чандрасекара (изотропное рассеяние) ¹	$a(E_T, \theta_0; \theta) = \frac{\Sigma_s}{4\pi\Sigma} \cdot \frac{\cos\theta}{\cos\theta + \cos\theta_0} \times h_p(\cos\theta_0)h_p(\cos\theta)$	$a(E_T, \theta_0) = 1 - \sqrt{1 - \frac{\Sigma_s}{\Sigma} h_p(\cos\theta_0)}$	286, 287
Маеркер и Макенталер (расчет методом Монте-Карло для бетона) ²	$a(E_T, \theta_0; \theta, \varphi) = \frac{0,0875\cos\theta}{\cos\theta + \cos\theta_0} (1 + 1,28\cos\theta) \times (1 + 1,62\cos\theta_0 - 0,42\cos^2\theta_0) [1 + (1 - \cos\theta_0) \times (1 - \cos\theta)] (-0,10 + 0,43\cos\varphi + 0,2\cos^2\varphi)$	$a(E_T, \theta_0) = 0,86 - 0,19\cos\theta_0$	78, 288
Формулы Ферми (изотропное рассеяние при слабом поглощении; большое Σ/Σ_a) ¹	$a(E_T, \theta_0 = 0^\circ; \theta) = \frac{\cos\theta + \sqrt{3\cos^2\theta}}{\pi(1 + 2/\sqrt{3})}$	$a(E_T, \theta_0) = \frac{\sqrt{\Sigma/\Sigma_a} - 1}{\sqrt{\Sigma/\Sigma_a} + \sqrt{3}\cos\theta_0}$	258

¹ Предположение об изотропном рассеянии нейтронов приводит к отсутствию зависимости дифференциального альbedo от угла φ .
² Состав бетона, 10^{21} атом/см³: Н — 8,5; С — 20,2; О — 35,5; Са — 1,1; Si — 1,7; Mg — 1,86; Fe — 0,193; Al — 0,556; К — 0,0403; Na — 0,0163.

Коэффициенты для расчетов дифференциальных характеристик

Граница энергетических групп, МэВ	A_q	B_q	C_q	D_q	A_d	B_d
10,5 ÷ 14,0	1,05-1	2,36-1	6,29-2	2,92-2	7,04-2	1,64-1
6,5 ÷ 10,5	7,23-2	9,69-2	1,18-1	7,44-1	7,51-2	3,51-2
4,0 ÷ 6,5	2,64-2	1,31-1	1,10-1	7,74-1	2,48-2	7,00-2
2,5 ÷ 4,0	1,50-2	2,29-1	1,54-1	1,32+0	1,65-2	6,07-2
1,4 ÷ 2,5	2,07-2	2,13-1	1,42-1	1,19+0	2,78-2	5,77-2
0,8 ÷ 1,4	4,41-4	3,32-1	1,76-1	1,30+0	4,15-3	4,27-2
0,4 ÷ 0,8	4,26-3	1,66-1	3,38-2	1,18-1	4,57-3	5,55-2
0,2 ÷ 0,4	9,24-3	1,56-1	6,32-2	2,03-1	5,69-3	7,83-2
0,1 ÷ 0,2	6,89-3	1,56-1	5,74-2	2,20-1	1,47-3	1,13-1
4,65-2 ÷ 0,1	5,52-3	1,48-1	6,08-2	2,15-1	6,69-4	1,49-1
2,15-2 ÷ 4,65-2	8,77-3	1,20-1	5,85-2	1,21-1	5,15-3	1,37-1
1,0-2 ÷ 2,15-2	5,57-3	1,34-1	6,62-2	2,49-1	4,03-3	1,65-1
4,65-3 ÷ 1,0-2	5,74-3	1,21-1	6,33-2	2,30-1	2,55-3	1,94-1
2,15-3 ÷ 4,65-3	9,30-3	1,30-1	3,29-2	2,77-1	6,31-3	1,74-1
1,0-3 ÷ 2,15-3	1,01-2	1,07-1	3,16-2	2,91-1	7,73-3	1,36-1
4,65-4 ÷ 1,0-3	1,14-2	1,05-1	3,40-2	3,31-1	1,60-2	9,20-2
4,65-5 ÷ 4,65-4	1,03-2	8,60-2	3,08-2	2,86-1	5,82-3	7,21-2
4,65-6 ÷ 4,65-5	8,35-2	4,66-2	4,12-2	3,22-1	4,91-3	4,56-2
1,0-6 ÷ 4,65-6	2,38-4	1,34-2	4,12-2	2,29-1	2,38-4	1,34-2

* В таблице числа $\pm a \pm b$ читать как $\pm a \cdot 10^{\pm b}$.

Альbedo нейтронов различных энергетических групп от воды*

C_d	D_d	b_0	b_1	b_2	b_3	b_4	b_5
4,33-2	1,15-1	4,41-1	-3,90-1	-1,45+0	3,53-1	2,67-1	1,50+0
1,26-1	1,21+0	4,41-1	-3,90-1	-1,45+0	3,53-1	2,67-1	1,50+0
1,21-1	1,26+0	1,28+0	-1,24+0	-5,11-1	3,52+0	3,15+0	5,66-1
1,22-1	1,08+0	1,88+0	-4,37-1	2,05+0	2,82+0	9,24-1	6,00-3
1,17-1	1,04+0	7,68-1	1,59-1	2,90-1	5,63-1	1,02+0	2,18-1
9,50-2	7,39-1	7,56+0	3,28-1	5,09-1	1,74+0	2,05-1	-9,28-1
4,53-2	7,80-1	6,35+0	3,75+0	3,71+0	5,60-3	-3,43-1	—
7,81-2	8,38-1	4,07+0	-8,92-1	-1,35+0	-4,29-1	9,08-1	—
7,33-2	8,14-1	3,58+0	2,56-1	-3,73-1	-2,71-1	2,02-1	—
8,06-2	8,28-1	3,58+0	3,75-1	-1,00-1	2,04-2	2,17-2	—
7,47-2	6,05-1	3,73+0	4,28-1	-3,78-1	—	—	—
8,77-2	7,35-1	3,69+0	4,45-1	-1,10-1	—	—	—
1,11-1	8,91-1	3,69+0	4,62-1	2,16-2	—	—	—
7,98-2	8,81-1	3,74+0	4,69-1	2,19-2	—	—	—
8,13-2	8,80-1	3,74+0	4,69-1	2,19-2	—	—	—
3,54-2	5,00-1	3,74+0	4,69-1	2,19-2	—	—	—
6,85-2	4,66-1	3,74+0	4,69-1	2,19-2	—	—	—
7,63-2	8,17-1	3,74+0	4,69-1	2,19-2	—	—	—
4,12-2	2,29-1	3,74+0	4,69-1	2,19-2	—	—	—

Таблица 8.13

Коэффициенты для расчетов дифференциальных характеристик альbedo

Граница энергетических групп, МэВ	A_q	B_q	C_q	D_q	A_d	B_d
10,5 ÷ 14,0	2,74-1	3,26-1	3,09-2	1,10+0	4,83-1	1,88-1
6,5 ÷ 10,5	5,56-1	3,75-1	2,29-2	1,39+0	2,16-1	2,25-1
4,0 ÷ 6,5	1,45-1	5,06-1	3,50-2	1,20+0	9,13-2	3,41-1
2,5 ÷ 4,0	5,61-2	5,08-1	4,45-2	9,50-1	7,43-2	3,70-1
1,4 ÷ 2,5	1,65-1	5,15-1	3,37-2	1,19+0	1,13-1	2,95-1
0,8 ÷ 1,4	3,82-2	5,10-1	4,08-2	8,47-1	1,25-1	3,13-1
0,4 ÷ 0,8	3,51-2	5,52-1	5,64-2	9,35-1	1,50-1	3,06-1
0,2 ÷ 0,4	1,09-1	4,53-1	1,77-2	9,32-1	1,95-1	2,95-1
0,1 ÷ 0,2	1,88-1	4,46-1	1,91-2	1,02+0	2,30-1	2,82-1
4,65-2 ÷ 0,1	1,55-1	4,52-1	2,18-2	1,01+0	2,07-1	3,14-1
2,15-2 ÷ 4,65-2	1,82-1	4,36-1	2,22-2	9,89-1	2,04-1	3,83-1
1,0-2 ÷ 2,15-2	1,75-1	4,23-1	2,41-2	9,29-1	2,04-1	4,16-1
4,65-3 ÷ 1,0-2	1,49-1	4,24-1	2,47-2	9,36-1	1,89-1	4,28-1
2,15-3 ÷ 4,65-3	1,73-1	4,13-1	2,46-2	9,64-1	1,45-1	4,46-1
1,0-3 ÷ 2,15-3	1,31-1	4,21-1	2,50-2	9,53-1	1,09-1	4,60-1
4,65-4 ÷ 1,0-3	8,71-1	3,98-1	2,96-2	8,32-1	1,50-1	3,87-1
4,65-5 ÷ 4,65-4	1,48-1	3,93-1	2,39-2	1,07+0	1,83-1	3,59-1
4,65-6 ÷ 4,65-5	2,53-1	2,73-1	2,23-2	9,69-1	2,32-1	3,15-1
1,0-6 ÷ 4,65-6	1,93+0	1,33-1	2,58-2	8,14-1	2,02-1	2,39-1

* В таблице числа $\pm a \pm b$ читать как $\pm a \cdot 10^{\pm b}$.

нейтронов различных энергетических групп от бетона*

C_d	D_d	b_0	b_1	b_2	b_3	b_4	b_5
1,95-2	1,01+0	4,37-2	-9,48-3	-1,24-1	-5,71-2	2,08-1	1,19-1
1,68-2	1,07+0	4,37-2	-9,48-3	-1,24-1	-5,71-2	2,08-1	1,19-1
4,28-2	1,05+0	5,56-2	-5,20-2	-4,17-2	1,89-2	2,93-1	5,91-2
4,60-2	8,82-1	6,24-2	-7,09-3	1,51-1	5,17-2	1,30-1	2,47-2
4,60-2	1,06+0	1,04-1	3,15-2	5,48-2	3,63-2	7,94-2	8,26-3
3,46-2	8,30-1	2,05-1	5,05-2	1,14-1	8,22-2	1,92-2	-2,01-2
3,07-2	9,02-1	2,50-1	1,98-1	1,90-1	4,58-2	-1,17-2	—
2,73-2	9,50-1	2,59-1	-1,98-1	-5,47-2	-1,87-2	4,21-2	—
2,00-2	9,73-1	2,19-1	2,19-2	-1,52-2	-2,10-2	9,26-3	—
1,60-2	8,88-1	2,15-1	2,68-2	-2,65-3	—	—	—
2,08-2	9,68-1	2,23-1	2,69-2	-1,60-2	—	—	—
2,15-2	8,81-1	2,18-1	2,70-2	-4,70-3	—	—	—
2,37-2	9,32-1	2,25-1	2,77-2	1,40-3	—	—	—
2,62-2	9,70-1	2,32-1	2,82-2	1,40-3	—	—	—
2,60-2	9,89-1	2,36-1	2,84-2	1,40-3	—	—	—
2,45-2	7,92-1	2,36-1	2,85-2	1,40-3	—	—	—
1,79-2	9,86-1	2,36-1	2,84-2	1,50-3	—	—	—
2,48-2	1,02+0	2,36-1	2,84-2	1,50-3	—	—	—
2,33-2	9,29-1	2,36-1	2,84-2	1,50-3	—	—	—

Коэффициенты для расчетов дифференциальных характеристик альbedo

Граница энергетических групп, МэВ	$A_{\text{ч}}$	$B_{\text{ч}}$	$D_{\text{ч}}$	$A_{\text{д}}$	$B_{\text{д}}$
10,5 ÷ 14,0	1,16-1	5,60-1	4,80-1	8,20-2	2,28-1
6,5 ÷ 10,5	3,47-1	5,10-1	7,79-1	3,49-1	2,67-1
4,0 ÷ 6,5	2,61-1	5,97-1	9,22-1	2,92-1	3,96-1
2,5 ÷ 4,0	2,87-1	5,43-1	8,30-1	3,05-1	3,78-1
1,4 ÷ 2,5	1,80-1	5,77-1	7,64-1	2,79-1	4,03-1
0,8 ÷ 1,4	2,70-1	5,35-1	9,41-1	3,25-1	3,06-1
0,4 ÷ 0,8	1,70-1	5,37-1	8,77-1	1,85-1	4,72-1
0,2 ÷ 0,4	1,04-1	5,82-1	8,23-1	1,75-1	4,60-1
0,1 ÷ 0,2	7,78-2	6,02-1	9,31-1	1,37-1	4,57-1
4,65-2 ÷ 0,1	1,04-1	4,89-1	6,70-1	1,07-1	4,57-1
2,15-2 ÷ 4,65-2	6,37-2	3,27-1	1,34+0	6,60-2	3,06-1
1,0-2 ÷ 2,15-2	2,79-2	6,18-1	8,07-1	2,44-2	6,22-1
4,65-3 ÷ 1,0-2	1,77-2	6,41-1	8,42-1	5,56-2	5,30-1
2,15-3 ÷ 4,65-3	4,18-2	6,06-1	8,60-1	3,84-2	6,44-1
1,0-3 ÷ 2,15-3	6,93-2	5,37-1	9,63-1	6,93-2	5,41-1
4,65-4 ÷ 1,0-3	5,03-2	6,64-1	8,22-1	3,49-2	6,22-1
4,65-5 ÷ 4,65-4	1,76-2	6,42-1	8,49-1	5,47-2	5,58-1
4,65-6 ÷ 4,65-5	2,16-2	5,35-1	6,96-1	5,21-2	5,03-1
1,0-6 ÷ 4,65-6	5,05-2	4,26-1	1,03+0	5,05-2	4,26-1

* В таблице числа $\pm a \pm b$ читать как $\pm a \cdot 10^{\pm b}$; для железа $C_{\text{ч(д)}} = 0$.

где \bar{R} — радиус средней кривизны отражающей поверхности; E_0 — энергия фотонов источника, МэВ; $n=1$ при $\bar{R} < 1/\mu$, $n=1/2$ при $\bar{R} \geq 1/\mu$.

§ 8.3. АЛЬBEDO НЕЙТРОНОВ

Наиболее подробная информация о характеристиках альbedo нейтронов содержится в работе [275]. В настоящем параграфе приводится основной справочный материал по альbedo нейтронов различных энергетических групп.

АЛЬBEDO ТЕПЛОВЫХ НЕЙТРОНОВ

Дифференциальные и интегральные характеристики альbedo тепловых нейтронов могут быть рассчитаны по формулам, приведенным в табл. 8.11, где приняты следующие обозначения: Σ — полное сечение взаимодействия; Σ_a , Σ_s — сечения поглощения и рассеяния соответственно; $h_p(\cos\alpha)$ — функция Чандрасекара (приведена в табл. 8.3), $p = \Sigma_s/\Sigma$. Геометрия задачи показана на рис. 8.1, б.

АЛЬBEDO МЕДЛЕННЫХ, ПРОМЕЖУТОЧНЫХ И БЫСТРЫХ НЕЙТРОНОВ

Для расчета дифференциального токового дозового $a_{\text{д}}(E_0, \theta_0; \theta, \varphi)$ и числового $a_{\text{ч}}(E_0, \theta_0; \theta, \varphi)$ альbedo нейтронов точечных мононаправленных источников различных энергетических групп ΔE_0 , падающих под углом

нейтронов различных энергетических групп от железа*¹

$D_{\text{д}}$	b_0	b_1	b_2	b_3	b_4	b_5
1,20-1	9,17-2	1,95-1	-1,13+0	-1,58+0	2,27+0	2,68+0
7,04-1	9,17-2	1,95-1	-1,13+0	-1,58+0	2,27+0	2,68+0
9,71-1	6,37-2	1,49-2	-4,23-1	-2,57-1	1,43+0	1,32+0
8,35-1	7,00-2	-1,41-1	-7,56-2	5,81-1	7,81-1	1,87-1
8,73-1	8,23-2	-8,90-2	1,60-1	4,48-1	3,40-1	—
9,59-1	1,21-1	4,16-2	1,78-1	1,85-1	1,70-1	—
8,63-1	2,61-1	1,12-1	1,16-1	3,45-2	1,03-1	—
8,64-1	2,36-1	7,08-2	5,22-2	1,31-2	2,80-3	—
8,65-1	3,05-1	8,26-2	2,35-2	—	—	—
7,23-1	4,44-1	6,28-2	1,35-2	—	—	—
1,28+0	1,22+0	9,84-2	1,84-2	—	—	—
8,02-1	3,37-1	1,69-2	2,50-3	—	—	—
6,67-1	7,12-1	2,54-2	3,00-4	—	—	—
8,97-1	5,00-1	1,78-2	2,00-4	—	—	—
9,66-1	6,27-1	2,24-2	3,00-4	—	—	—
9,00-1	8,48-1	3,03-2	4,00-4	—	—	—
9,48-1	9,33-1	3,33-2	4,00-4	—	—	—
9,77-1	9,33-1	3,33-2	4,00-4	—	—	—
1,03+0	9,33-1	3,33-2	4,00-4	—	—	—

θ_0 к поверхности полубесконечных отражателей из воды, бетона* и железа и детектируемых в направлении, определяемом углами θ и φ , при пороговой энергии детектирования 1 эВ рекомендуется, подобно формуле (8.9) для фотонного излучения, формула вида [289, 290]

$$A_{\text{д(ч)}}(\Delta E_0, \theta_0; \theta, \varphi) = \frac{A_{\text{д(ч)}}(\Delta E_0) \sum_{i=0}^5 [b_i(\cos\theta_s)^i] + B_{\text{д(ч)}}(\Delta E_0)[h_p(\cos\theta_0)h_p(\cos\theta) - 1] + C_{\text{д(ч)}}(\Delta E_0)(|\cos\theta_s| + \cos\theta_s)}{1 + (\cos\theta_0/\cos\theta)D_{\text{д(ч)}}(\Delta E_0)} \quad (8.25)$$

где $A_{\text{д(ч)}}(\Delta E_0)$; $B_{\text{д(ч)}}(\Delta E_0)$; $C_{\text{д(ч)}}(\Delta E_0)$; $D_{\text{д(ч)}}(\Delta E_0)$ — коэффициенты, зависящие от энергии падающих нейтронов ΔE_0 и материала отражателя (табл. 8.12—8.14), нижние индексы «д» соответствуют дозовым характеристикам (по поглощенной дозе), «ч» — числовым; b_i — коэффициенты разложения индикатрисы рассеяния по степеням i косинуса угла рассеяния (табл. 8.12—8.14); θ_s — угол рассеяния, определяемый по формуле (8.10); $h_p(\cos\theta)$ — функция Чандрасекара при $p=0,6$ (табл. 8.3, рис. 8.2); в расчетах распределение нейтронов внутри энергетических групп ΔE_0 принималось равномерным; погрешность описания дифференциальных характеристик по формуле (8.25) не превышает 30 %.

* Рассмотрен бетон следующего химического состава, 10^{21} атом/см²: Н — 6,023; С — 7,07; О — 44,7; Mg — 0,251; Al — 0,402; Si — 7,57; S — 0,169; Ca — 9,02; Fe — 0,13.

Пример расчета по формуле (8.25). Рассчитать a_d по поглощенной дозе для точечного мононаправленного источника нейтронов с энергией $\Delta E_0 = (1,4 \div 2,5)$ МэВ, падающих под углом $\theta_0 = 45^\circ$ к поверхности полубесконечного отражателя из железа, при детектировании нейтронов с энергией $E > 1$ эВ под углами $\theta = 30^\circ$ и $\varphi = 0^\circ$.

Решение. Для предложенного примера: $\theta_s = 105^\circ$; $\cos\theta_s = -0,259$; $\cos\theta_0 = 0,707$; $\cos\theta = 0,866$; $h_p(\cos\theta_0) = 1,29$; $h_p(\cos\theta) = 1,315$; $A_d(\Delta E_0) = 0,279$; $B_d(\Delta E_0) = 0,403$; $C_d(\Delta E_0) = 0$; $D_d(\Delta E_0) = 0,873$; $\sum_{i=0}^5 b_i \mu_i^i = 0,0823(-0,259)^0 - 0,089 \times (-0,259)^1 + 0,160(-0,259)^2 + 0,448(-0,259)^3 + 0,340(-0,259)^4 = 0,0823 + 0,0230 + 0,0107 - 0,00778 + 0,00153 = 0,110$.

Используя эти данные, определяем по формуле (8.25)

$$a_d = \frac{0,279 - 0,110 + 0,403(1,29 \cdot 1,315 - 1) + 0}{1 + \frac{0,707}{0,866} \cdot 0,873} = 0,181,$$

что с погрешностью 6% совпадает с данными расчетов методом Монте-Карло.

Для оценочных расчетов усредненного по азимутальному углу дифференциального дозового токового альbedo быстрых нейтронов от бетона, железа и грунта удобна формула [291]

$$a_{дн}(E_0, \theta_0; \theta) = a_{дн}(E_0, \theta_0 = \theta = 0^\circ) \cos^{-1/3} \theta_0 \cos \theta, \quad (8.26)$$

где значения $a_{дн}(E_0, \theta_0 = \theta = 0^\circ)$ соответствуют дифференциальному альbedo при $\theta_0 = \theta = 0^\circ$ для энергии детектирования больше 10 эВ и приводятся в табл. 8.15.

Таблица 8.15

Дифференциальное дозовое альbedo $a_{дн}(E_0, \theta_0 = \theta = 0^\circ)$

Материал	Энергия E_0 , МэВ								Спектр деления
	0,1	0,25	0,5	1,0	2,0	3,0	5,0	14,0	
Бетон	0,0948	0,1027	0,1062	0,1323	0,1164	0,1030	0,0834	0,0552	0,1110
Сухой грунт	0,0967	0,0895	0,1002	0,1272	0,1103	0,0979	0,0784	0,0535	0,1050
Грунт с 50%-ным обогащением водой	0,0868	0,0957	0,0952	0,1209	0,1074	0,0926	0,0746	0,0533	0,1015
Грунт со 100%-ным обогащением водой	0,0778	0,0818	0,0839	0,1054	0,0891	0,0791	0,0644	0,0463	0,0868
Железо	0,1750	0,1752	0,1801	0,1182	0,1477	0,1508	0,1158	0,0802	0,1366

Зависимость альbedo от толщины отражателя имеет характер, подобный зависимости (8.22) для фотонного излучения.

В заключение отметим, что числовое альbedo нейтронов может значительно зависеть от выбора пороговой энергии детектирования.

8.4. АЛЬБЕДО ЭЛЕКТРОНОВ

Токовые интегральные числовые альbedo моноэнергетических электронов для различных энергий и отражателей приведены для нормального падения на полубесконечные отражатели на рис. 8.6 [292] и в табл. 8.16 [267], для различных углов падения θ_0 — на рис. 8.7 [267].

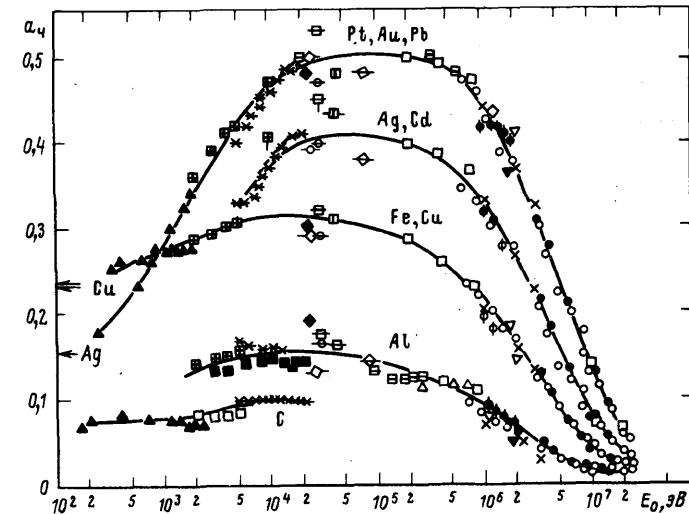


Рис. 8.6. Интегральное токовое числовое альbedo плоского мононаправленного источника моноэнергетических электронов с энергией E_0 , падающих нормально на полубесконечные отражатели из различных материалов, по данным разных авторов [292]

Таблица 8.16

Интегральное токовое числовое альbedo моноэнергетического пучка электронов с энергией E_0 для полубесконечных отражателей из различных материалов при $\theta_0 = 0^\circ$ [267]

E_0 , МэВ	Материал отражателя					
	Углерод	Алюминий	Медь	Серебро	Тантал	Уран
4	0,008	0,033	0,11	0,187	0,275	0,306
6	0,0055	0,018	0,073	0,134	0,208	0,237
8	0,0045	0,014	0,050	0,096	0,160	0,183
10,2	0,0036	0,011	0,038	0,074	0,125	0,141
12	0,003	0,0089	0,030	0,061	0,095	0,116

Зависимость средней энергии отраженных электронов $\bar{E}_{отр}/E_0$ от угла падения θ_0 мононаправленного пучка моноэнергетических электронов с погрешностью $\pm 10\%$ не зависит от E_0 при изменении $0,2 \text{ МэВ} \leq E_0 \leq 3,0 \text{ МэВ}$ (рис. 8.8) [267].

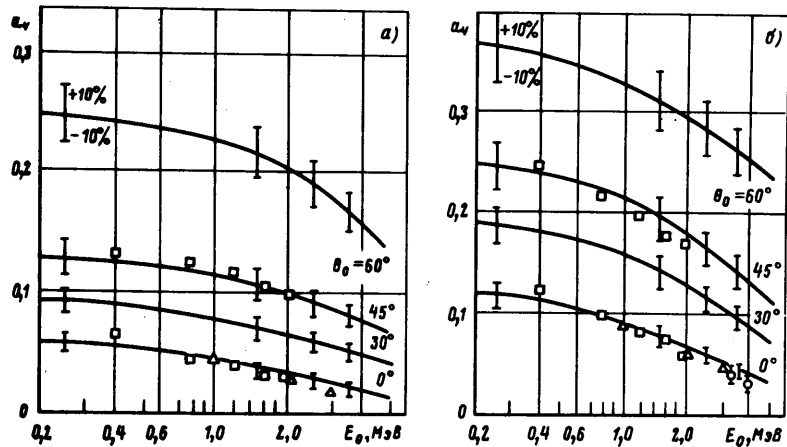


Рис. 8.7. Интегральное токовое числовое альbedo моноэнергетических электронов разных энергий от полубесконечных тканеэквивалентного ($Z=7,2$) (а) и алюминиевого ($Z=13$) (б) отражателей при различных углах падения электронов: — расчетные данные [267]; значки — экспериментальные данные разных авторов

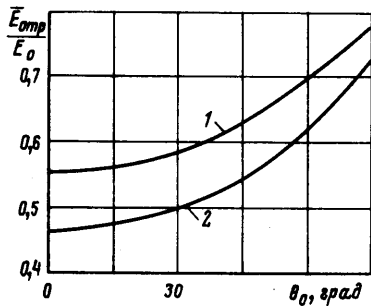


Рис. 8.8. Зависимость средней энергии отраженных электронов $\bar{E}_{отр}/E_0$ от угла падения θ_0 моноэнергетических электронов с энергией $E_0=0,2 \div 3,0$ МэВ на алюминиевый (1) и тканеэквивалентный (2) полубесконечные поглотители [267]

8.5. СКАЙШАЙН И КВАЗИСКАЙШАЙН ИЗЛУЧЕНИЙ

Для решения многих практических задач необходимы сведения о характеристиках полей нейтронов и фотонов в воздухе вблизи границы раздела с землей [273]. Радиационная обстановка вокруг различных ядерно-технических установок часто определяется рассеянным излучением, попадающим в точку детектирования вблизи поверхности земли после отражения от воздуха. Круг этих задач принято называть «скайшайн» («свечение неба») [293-303]. Таким образом, скайшайн является задачей альbedo при отражении излучения от воздуха вблизи границы с землей. Такие задачи обычно реализуются для коллимированных источников, излучение которых не направлено на детектор.

В наиболее общем виде скайшайн определяется мощностью W , энергией E_0 , телесным углом Ω_0 , определяемым для осесимметричных

источников половинным углом коллимации θ_0 , и угловым распределением излучения источника, высотой расположения источника h_s и детектора h_D над поверхностью земли, проекцией расстояния от источника до детектора на поверхность земли R^{*1} (рис. 8.9). В ряде случаев источник сверху может быть перекрыт защитой (крышей) толщиной T из материала с атомным номером Z .

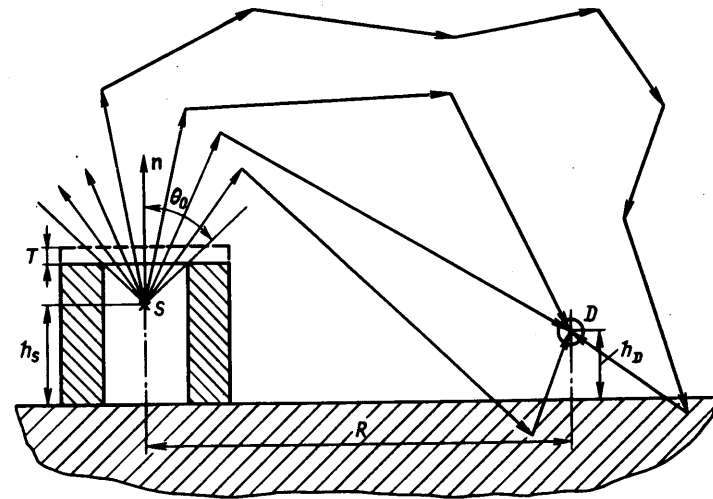


Рис. 8.9. Геометрия задач по определению поля скайшайн излучения источника S в точке детектирования D и типичные траектории ионизирующих частиц

Для многих задач может представлять интерес регистрация вторичного излучения по отношению к основному первичному излучению источника, например вторичного фотонного излучения для источника нейтронов. В этом случае мы приходим по аналогии с квазиальbedo к понятию квазискайшайн излучения.

В [293, 294, 301] исходя из расчетов методом Монте-Карло показано, что мощность эквивалентной дозы в нанозивертах на одну частицу первичного излучения в задачах скайшайн и квазискайшайн может быть рассчитана по формулам:

а) для источников фотонов при $h_s=2$ м, $h_D=1$ м для $0,2 < R < 0,7$ км с погрешностью не более 60 %^{*2} [293]

$$\dot{H}_\gamma(R) = \frac{Q_\gamma(E_{0\gamma}, \theta_0)}{R^2} \exp[-B_\gamma(E_{0\gamma}, \theta_0)R], \quad (8.27)$$

а для $0 < \cos \theta_0 < 0,9$ и $0,02 \leq R \leq 1$ км по формуле [294]

*¹ В реальных задачах, когда обычно $R \gg h_D$, $R \gg h_s$, R практически совпадает с расстоянием между источником и детектором.

*² В диапазоне $0,1 < R < 0,2$ км и $0,7 < R < 1$ км погрешности расчетов могут достигать 300 %.

Таблица 8.17

Коэффициенты $Q_\gamma(E_{0\gamma}, \theta_0)$, нЗв·м²/фотон источника, и $B_\gamma(E_{0\gamma}, \theta_0)$, м⁻¹, для расчетов скойшайн фотонов по формуле (8.27)

$E_{0\gamma}$, МэВ	θ_0 , град							
	30		60		75		85	
	Q_γ	B_γ	Q_γ	B_γ	Q_γ	B_γ	Q_γ	B_γ
0,55	1,15—8	8,0—3	1,16—8	7,1—3	1,95—8	7,6—3	2,23—8	7,5—3
0,7	9,45—9	7,2—3	1,24—8	6,6—3	2,64—8	7,5—3	2,94—8	7,1—3
1,25	9,83—9	6,8—3	1,05—8	5,0—3	1,57—8	4,9—3	3,02—8	5,2—3
2,0	9,6—9	6,4—3	1,23—8	4,9—3	2,26—8	4,7—3	2,52—8	3,7—3
4,0	5,0—9	5,1—3	7,85—9	3,9—3	8,15—9	1,9—3	2,19—8	2,4—3
6,0	4,61—9	5,4—3	4,55—9	2,9—3	1,14—8	2,8—3	1,70—8	1,6—3
8,0	4,23—9	5,4—3	4,41—9	3,0—3	7,55—9	2,0—3	1,49—8	1,4—3

Коэффициенты $Q_n(\Delta E_{0n}, \Delta\theta_0)$, нЗв·м/нейтр. источника, и $B_n(\Delta E_{0n}, \Delta\theta_0)$, м⁻¹, для расчетов скойшайн нейтронов по формуле (8.29)

E_{0n} , МэВ	$0,8 < \cos\theta_0 < 1,0$ $\Delta\theta_0 = (0 \div 37)^\circ$		$0,6 < \cos\theta_0 < 0,8$ $\Delta\theta_0 = (37 \div 53)^\circ$	
	Q_n	B_n	Q_n	B_n
$4,14 \cdot 10^{-7} \div 1,00 \cdot 10^{-10}$	2,79—8	4,08—2	3,67—8	4,26—2
$1,07 \cdot 10^{-5} \div 5,04 \cdot 10^{-6}$	4,46—8	3,29—2	6,01—8	3,17—2
$1,58 \cdot 10^{-3} \div 4,54 \cdot 10^{-4}$	2,07—7	2,96—2	2,42—7	2,96—2
$1,50 \cdot 10^{-1} \div 8,65 \cdot 10^{-2}$	5,34—8	1,76—2	4,82—8	1,69—2
$1,11 \div 9,07 \cdot 10^{-1}$	4,28—8	8,27—3	4,34—8	7,93—3
$3,01 \div 2,46$	3,32—8	6,07—3	3,01—8	5,39—3
$14,9 \div 13,5$	1,48—8	4,76—3	1,78—8	4,78—3
$50 \div 45$	8,98—9	2,99—3	1,04—8	2,64—3
$100 \div 90$	8,34—9	3,02—3	8,68—9	2,27—3
$400 \div 375$	6,77—9	1,66—3	8,25—9	1,20—3

Коэффициенты $Q_{n,\gamma}(\Delta E_{0n}, \Delta\theta_0)$, нЗв·м/нейтр. источника, типа нейтрон — фотон по формуле (8.30) (расчет эквивалентной дозы вторичного γ -излучения от источника нейтронов)

E_{0n} , МэВ	$0,8 < \cos\theta_0 < 1,0$ $\Delta\theta_0 = (0 \div 37)^\circ$		$0,6 < \cos\theta_0 < 0,8$ $\Delta\theta_0 = (37 \div 53)^\circ$	
	$Q_{n,\gamma}$	$B_{n,\gamma}$	$Q_{n,\gamma}$	$B_{n,\gamma}$
$4,14 \cdot 10^{-7} \div 1,00 \cdot 10^{-10}$	9,31—11	4,49—3	9,52—11	4,63—3
$1,07 \cdot 10^{-5} \div 5,04 \cdot 10^{-6}$	6,47—11	4,49—3	6,34—11	4,48—3
$1,58 \cdot 10^{-3} \div 4,54 \cdot 10^{-4}$	4,28—11	4,55—3	4,92—11	4,62—3
$1,50 \cdot 10^{-1} \div 8,65 \cdot 10^{-2}$	2,85—11	3,72—3	2,62—11	4,00—3
$1,11 \div 9,07 \cdot 10^{-1}$	2,05—11	3,47—3	1,70—11	3,41—3
$3,01 \div 2,46$	1,18—11	3,04—3	1,27—11	2,99—3
$14,9 \div 13,5$	2,87—10	3,63—3	3,25—10	3,72—3
$50 \div 45$	2,79—11	2,09—3	2,76—11	1,69—3
$100 \div 90$	5,09—11	2,54—3	2,90—11	1,53—3
$400 \div 375$	3,05—11	1,50—3	3,22—11	1,09—3

$$\dot{H}_\gamma(R) = \frac{2}{1 - \cos\theta_0} \frac{A(E_{0\gamma}) \cdot 10^{-13}}{R^{B(E_{0\gamma})}} e^{+10^{-2}[C(E_{0\gamma})\theta_0 - D(E_{0\gamma})R]}, \quad (8.28)$$

б) для источников нейтронов при $h_s = 15$ м, $h_D = 0$ м для $0,1 < R < 2$ км погрешностью около 30 % по формуле [301]

$$\dot{H}_n(R) = \frac{Q_n(\Delta E_{0n}, \Delta\theta_0)}{R} \exp[-B_n(\Delta E_{0n}, \Delta\theta_0)R], \quad (8.29)$$

Таблица 8.18

Коэффициенты для расчетов скойшайн фотонов по формуле (8.28)

$E_{0\gamma}$, МэВ	A	B	C	D
0,7	10,5	0,9	4,72	0,928
1,25	5,28	0,9	5,55	0,735
6	0,76	0,85	7,15	0,420

Таблица 8.19

$\Delta\theta_0$, м⁻¹, для расчетов скойшайн нейтронов по формуле (8.29)

$0,4 < \cos\theta_0 < 0,6$ $\Delta\theta_0 = (53 \div 66)^\circ$		$0,2 < \cos\theta_0 < 0,4$ $\Delta\theta_0 = (66 \div 78)^\circ$		$0,0 < \cos\theta_0 < 0,2$ $\Delta\theta_0 = (78 \div 90)^\circ$	
Q_n	B_n	Q_n	B_n	Q_n	B_n
2,39—8	4,08—2	1,93—8	4,02—2	2,49—8	4,04—2
1,10—7	3,54—2	2,26—7	3,77—2	1,89—7	3,76—2
1,49—7	2,79—2	1,32—7	2,78—2	1,96—7	2,97—2
6,47—8	1,81—2	7,54—8	1,83—2	8,94—8	1,87—2
5,45—8	8,40—3	5,83—8	8,26—3	8,04—8	8,98—3
3,56—8	5,52—3	4,65—8	5,83—3	5,01—8	5,60—3
1,99—8	4,57—3	3,21—8	4,71—3	3,94—8	4,93—3
1,26—8	2,38—3	1,81—8	2,30—3	3,92—8	2,83—3
1,16—8	1,92—3	1,36—8	1,50—3	2,47—8	1,23—3
1,11—8	9,30—4	1,40—8	6,64—4	2,43—8	5,46—4

Таблица 8.20

$B_{n,\gamma}(\Delta E_{0n}, \Delta\theta_0)$, м⁻¹, для расчетов квазискойшайн дозы вторичного γ -излучения от источника нейтронов

$0,4 < \cos\theta_0 < 0,6$ $\Delta\theta_0 = (53 \div 66)^\circ$		$0,2 < \cos\theta_0 < 0,4$ $\Delta\theta_0 = (66 \div 78)^\circ$		$0,0 < \cos\theta_0 < 0,2$ $\Delta\theta_0 = (78 \div 90)^\circ$	
$Q_{n,\gamma}$	$B_{n,\gamma}$	$Q_{n,\gamma}$	$B_{n,\gamma}$	$Q_{n,\gamma}$	$B_{n,\gamma}$
9,06—11	4,55—3	1,12—10	4,91—3	1,23—10	5,05—3
6,22—11	4,58—3	6,91—11	4,91—3	6,25—11	4,92—3
4,15—11	4,54—3	4,17—11	4,64—3	4,18—11	4,86—3
2,91—11	4,25—3	2,86—11	4,29—3	2,68—11	4,24—3
2,09—11	3,66—3	1,60—11	3,35—3	1,74—11	3,64—3
1,63—11	3,42—3	1,82—11	3,46—3	1,55—11	3,60—3
3,56—10	3,54—3	4,23—10	3,65—3	5,96—10	4,10—3
3,44—11	1,73—3	4,12—11	1,69—3	5,45—11	2,08—3
3,27—11	1,31—3	3,74—11	1,06—3	3,89—11	9,86—4
3,58—11	8,52—4	3,96—11	6,19—4	3,36—11	7,28—5

в) для вторичного γ -излучения от источника нейтронов при $h_s = 15$ м, $h_D = 0$ м для $0,1 < R < 2$ км по формуле [301]

$$\dot{H}_{n,\gamma}(R) = \frac{Q_{n,\gamma}(\Delta E_{0n}, \Delta \theta_0)}{R} \exp[-B_{n,\gamma}(\Delta E_{0n}, \Delta \theta_0)R]. \quad (8.30)$$

В формулах (8.27) — (8.30) R выражено в метрах, $Q_{\gamma}(E_{0\gamma}, \theta_0) = \lim_{R \rightarrow 0} \dot{H}_{\gamma}(R) \cdot R^2$, $Q_n(\Delta E_{0n}, \Delta \theta_0) = \lim_{R \rightarrow 0} \dot{H}_n(R)R$, $Q_{n,\gamma}(\Delta E_{0n}, \Delta \theta_0) = \lim_{R \rightarrow 0} \dot{H}_{n,\gamma}(R)R$.

В формуле (8.28) θ_0 выражен в градусах. В формулах (8.27) и (8.28) первичное излучение испускается в конус с телесным углом, определяемым половинным углом коллимации θ_0 , в формулах (8.29) и (8.30) — в пространство между конусами с единой осью и с углом между конусами (угловой интервал) $\Delta \theta_0$.

Значения коэффициентов θ_j , B_j и A , B , C , D , определенные методом наименьших квадратов, приведены в табл. 8.17—8.20.

Для приближенной оценки сдвигай фотон может быть использована концепция однократного рассеяния с учетом многократно рассеянных фотонов соответствующими факторами накопления [303].

Пример. Точечный изотропный источник ^{60}Co ($E_0 = 1,25$ МэВ) активностью 1 Гбк коллимирован вверх с половинным углом коллимации 75° . Рассчитать мощность эквивалентной дозы в точке детектирования на расстоянии $R = 200$ м, если $h_s = 2$ м, $h_D = 1$ м.

Решение. В конус с полууглом 75° источник испускает

$$S = A n_{\gamma} \frac{\int_0^{2\pi} \int_0^{75^\circ} \sin \theta d\theta d\varphi}{4\pi} = 10^9 \cdot 2 \cdot \frac{4,65}{4\pi} = 7,4 \cdot 10^8 \text{ фотон/с.}$$

В приведенной формуле A — активность источника, Бк; $n_{\gamma} = 2$ фотон/расп. — число фотонов, испускаемых ^{60}Co на 1 распад.

По формуле (8.27) $\dot{H}_{\gamma}(R) = S \frac{Q_{\gamma}(E_{0\gamma}, \theta_0)}{R^2} \exp[-B_{\gamma}(E_{0\gamma}, \theta_0)R] = 7,4 \cdot 10^8 \frac{1,57 \cdot 10^{-8}}{200^2} \times$
 $\times \exp[-4,9 \cdot 10^{-3} \cdot 200] = 1,09 \cdot 10^{-4} \text{ нЗв/с} = 0,109 \text{ пЗв/с.}$

По формуле (8.28)

$$\dot{H}_{\gamma}(R) = S \frac{2}{1 - \cos \theta_0} \frac{A(E_{0n}) 10^{-13}}{R^{B(E_{0n})}} e^{+10^{-2}[C(E_{0n})E_0 - D(E_{0n})R]} = 7,4 \cdot 10^8 \frac{2}{1 - 0,26} \times$$

 $\times \frac{5,28 \cdot 10^{-13}}{200^{0,9}} e^{+10^{-2}[5,55 \cdot 75 - 0,735 \cdot 200]} = 1,32 \cdot 10^{-4} \text{ нЗв/с} = 0,132 \text{ пЗв/с.}$

Отличие в расчетах по формулам (8.27) и (8.28) в данном примере составило около 20 %.

ФИЗИЧЕСКИЕ ПОСТОЯННЫЕ

Скорость света в вакууме $2,998 \cdot 10^8$ м/с = $2,998 \cdot 10^{10}$ см/с
 Элементарный заряд (заряд электрона) $1,602 \cdot 10^{-19}$ Кл
 $[4,803 \cdot 10^{-10}$ СГСЭ]

Масса покоя электрона $9,110 \cdot 10^{-31}$ кг = $9,110 \cdot 10^{-28}$ г
 Масса покоя протона $1,673 \cdot 10^{-27}$ кг = $1,673 \cdot 10^{-24}$ г
 Масса покоя нейтрона $1,675 \cdot 10^{-27}$ кг = $1,675 \cdot 10^{-24}$ г
 Атомная единица массы (а. е. м.) * 1 а. е. м. = $1,660 \cdot 10^{-27}$ кг = $= 1,660 \cdot 10^{-24}$ г

Постоянная Планка $h = 6,626 \cdot 10^{-24}$ Дж·с [$6,626 \cdot 10^{-27}$ эрг·с]

Число Авогадро $N_A = 6,022 \cdot 10^{23}$ моль $^{-1}$
 Классический радиус электрона $r_s = 2,818 \cdot 10^{-15}$ м = $2,818 \cdot 10^{-13}$ см;
 $r_s^2 = 7,940 \cdot 10^{-30}$ м 2 = $7,940 \cdot 10^{-26}$ см 2

ПЛОТНОСТЬ ВЕЩЕСТВ ρ

Таблица П.1

Плотность чистых элементов					
Элемент		Атомный номер	Атомная масса	Плотность ρ , г/см $^{3 \cdot 21}$ [145]	Число атомов в единице объема, 10^{22} см $^{-3}$
Название	Обозначение				
Алюминий	Al	13	26,982	2,70	6,03
Барий	Ba	56	137,3	3,78	1,66
Бериллий	Be	4	9,012	1,84	12,30
Бор	B	5	10,81	2,34	13,04
Ванадий	V	23	50,941	5,96	7,04
Висмут	Bi	83	208,980	9,747	2,81
Вольфрам	W	74	183,85	19,1	6,26
Германий	Ge	32	72,59	5,46	4,53
Железо	Fe	26	55,847	7,87	8,49
Золото	Au	79	196,966	19,3	5,90
Индий	In	49	114,82	7,28	3,82
Иод	I	53	126,904	4,94	2,34
Кадмий	Cd	48	112,40	8,648	4,63
Калий	K	19	39,098	0,87	1,34
Кальций	Ca	20	40,08	1,55	2,33
Кобальт	Co	27	58,933	8,71	8,90
Кремний	Si	14	28,086	2,42 *2	5,19
Литий	Li	3	6,941	0,534	4,63

* Внесистемная единица, разрешенная к применению без ограничения срока. Атомная единица массы соответствует энергии 931,50 МэВ.

Продолжение табл. П.1

Элемент		Атомный номер	Атомная масса	Плотность ρ , г/см ³ *1 [145]	Число атомов в единице объема, 10 ²² см ⁻³
Название	Обозначение				
Магний	Mg	12	24,305	1,741	4,31
Марганец	Mn	25	54,938	7,42	8,13
Медь	Cu	29	63,546	8,93	8,46
Молибден	Mo	42	95,94	9,01	5,66
Натрий	Na	11	22,990	0,971	2,54
Никель	Ni	28	58,70	8,90	9,13
Олово	Sn	50	118,69	7,29*3	3,70
Ртуть	Hg	80	200,59	13,546	4,07
Самарий	Sm	62	150,4	7,8	3,12
Свинец	Pb	82	207,2	11,34	3,30
Сера	S	16	32,06	2,07*4	3,89
Серебро	Ag	47	107,868	10,5	5,86
Сурьма	Sb	51	121,75	6,618	3,27
Таллий	Tl	81	204,37	11,86	3,49
Теллур	Te	52	127,60	6,25*2	2,95
Титан	Ti	22	47,90	4,5	5,66
Торий	Th	90	232,038	11,3	2,93
Углерод	C	6	12,011	2,25*5	11,28
Уран	U	92	238,029	18,7	4,73
Фосфор	P	15	30,974	1,83*6	3,56
Хром	Cr	24	51,996	7,1	8,22
Цинк	Zn	30	65,38	6,92	6,37
Цирконий	Zr	40	91,22	6,44	4,25

*1 При стандартной температуре и давлении.

*2 Кристаллический.

*3 Белое.

*4 Ромбическая.

*5 Плотность графита в виде блоков 1,67 г/см³ [304].

*6 Белый.

Таблица П.2

Плотность некоторых газов при $t=0^\circ\text{C}$ и давлении 1013 гПа [760 мм рт. ст.] [145]

Элемент или соединение	Формула	Атомный номер	Атомная масса	Плотность ρ , 10 ⁻³ г/см ³	Число атомов в единице объема, 10 ¹⁹ см ⁻³
Азот	N ₂	7	14,0067	1,2505	5,38
Аргон	Ar	18	39,948	1,7839	2,69
Водород	H ₂	1	1,0079	0,08987	5,37
Воздух	N ₂ , O ₂ , Ar*1	7,26*2	—	1,2928	5,35
Кислород	O ₂	8	15,9994	1,42904	5,38
Криптон	Kr	36	83,80	3,74	2,69
Ксенон	Xe	54	131,30	5,89	2,70
Неон	Ne	10	20,179	0,8999	2,68
Хлор	Cl	17	35,453	3,22	5,47

*1 Состав воздуха по объему: N—78 %, O—21 %, Ar—1 %, по массе: N—75,5 %, O—23,2 %, Ar—1,3 % [15, 273].

*2 Среднее значение.

Таблица П.3

Плотность некоторых жидкостей при $t=20^\circ\text{C}$ [145]

Жидкость	Плотность ρ , г/см ³	Жидкость	Плотность ρ , г/см ³
Бензин	0,68 ÷ 0,72	Масло машинное	0,90 ÷ 0,92
Вода*1	1,00*2	Морская вода	1,01 ÷ 1,05
Керосин	0,82	Нефть	0,81 ÷ 0,85

*1 В воде содержится 3,34 · 10²² молекула/см³, 1,00 · 10²³ атом/см³. В 1 см³ воды содержится 3,34 · 10²² атомов кислорода и 6,69 · 10²² атомов водорода.*2 При $t=4^\circ\text{C}$.

Таблица П.4

Плотность некоторых веществ [79, 145]

Вещество	Плотность ρ , г/см ³	Вещество	Плотность ρ , г/см ³
Асфальт	1,1 ÷ 1,5	Карбид бора	2,54
Бетон:		Картон	0,69
обычный	2,35	Кирпич	1,4 ÷ 2,2
лимонитовый	2,96	Кремень	2,63
магнетитовый	3,41	Лед	0,917
лимонитожелезистый	4,27	Мел	1,9 ÷ 2,8
лимонитомагнетитовый	3,44	Мрамор	2,6 ÷ 2,84
феррофосфорный	4,8	Парафин	0,87 ÷ 0,91
Гипс	2,31 ÷ 2,33	Песчаник	2,14 ÷ 2,36
Глина	1,8 ÷ 2,6	Плексиглас	1,18
Дерево:		Полиэтилен	0,92
береза	0,51 ÷ 0,77	Резина мягкая	1,1
дуб	0,60 ÷ 0,90	Резина твердая	1,19
ель канадская	0,48 ÷ 0,70	Сахар	1,59
сосна белая	0,55 ÷ 0,50	Серпентин	2,5 ÷ 2,65
сосна обыкновенная	0,37 ÷ 0,60	Снег (рыхлый)	0,12
ясень	0,65 ÷ 0,85	Сталь катаная	7,85 ÷ 8,00
Дюралюминий (Cu; Mg; Si; Mn)	2,79	Сталь литая	7,50 ÷ 7,92
Известняк	2,68 ÷ 2,76	Стекло (обыкновенное)	2,4 ÷ 2,8
Иодистый натрий	3,667	Цемент затвердевший	2,7 ÷ 3,0

Таблица П.5

Плотность и массовая доля химических элементов, входящих в состав тканеэквивалентных веществ, %

Биологическая ткань	ρ , г/см ³	Химический элемент							Литературная ссылка	
		H	C	N	O	P	S	K		Ca
Мягкая (состав сферы МКРЕ)	1,0	10,1	11,1	2,6	76,2	—	—	—	—	[5, 19]
Мышечная	1,0	10,0	11,1	2,8	75,3	0,2	0,3	0,3	—	[305]
Костная	1,5	4,0	15,6	4,4	44,3	10,5	—	—	21,1	[305]
Условного человека		10,0	23,1	2,6	61,3	1,1	0,2	0,2	1,4	[305]

В табл. П. 6 приводятся часто используемые при расчетах защиты экспоненциальная функция e^{-x} и интегральные показательные функции $E_n(x)$ для $n=1, 2, 3$, которые в интегральной форме можно записать следующим образом:

$$E_n(x) = x^{n-1} \int_x^{\infty} \frac{e^{-y}}{y^n} dy = \int_1^{\infty} \frac{e^{-xt}}{t^n} dt = \int_0^1 w^{n-2} e^{-x/w} dw. \quad (\text{П.1})$$

где n — целое положительное число.

При $n=0$ $E_0(x) = \frac{e^{-x}}{x}$. (П.2)

При $n=1$ $E_1(x) = \int_x^{\infty} \frac{e^{-y}}{y} dy$. (П.3)

Отметим, что $E_1(x)$ можно представить в виде ряда $E_1(x) = -0,577216 - \ln x + \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^{n+1} \frac{x^n}{n!n}$. (П.4)

Иногда функцию $E_1(x)$ для положительных x обозначают $-Ei(-x)$. Следовательно, $E_1(x) = -Ei(-x)$. Функцию $-Ei(-x)$ не следует путать с функцией $-Ei(x) = E_1(-x)$

При $n=2$

$$E_2(x) = x \int_x^{\infty} \frac{e^{-y}}{y^2} dy = e^{-x} - xE_1(x). \quad (\text{П.5})$$

Функцию $E_2(x)$ иногда называют функцией Кинга и обозначают $\Phi(x)$. Следовательно, $\Phi(x) = E_2(x)$.

При $n=3$

$$E_3(x) = x^2 \int_x^{\infty} \frac{e^{-y}}{y^3} dy = \frac{1}{2} [x^2 E_1(x) - e^{-x}(x-1)] = \frac{1}{2} [e^{-x} - xE_2(x)]. \quad (\text{П.6})$$

Для $x > 10$ значения $E_n(x)$ с погрешностью до 0,2 % можно рассчитать по формуле

$$E_n(x) \approx e^{-x} Q_n(x), \quad (\text{П.7})$$

где $Q_n(x) = \frac{1}{x+n} + \frac{n}{(x+n)^3}$.

Рекуррентное соотношение для интегральной показательной функции имеет вид

$$E_n(x) = \frac{1}{n-1} [e^{-x} - xE_{n-1}(x)]. \quad (\text{П.8})$$

В табл. П. 7 приводятся функции интегрального секанса (интегралы Зиверта).

Таблица функций e^{-x} , $E_1(x)$, $E_2(x)$, $E_3(x)$

x	e^{-x}	$E_1(x)$	$E_2(x)$	$E_3(x)$
0,00	1,000	∞	1,000	0,5000
0,01	$9,900 \cdot 10^{-1}$	$4,038 \cdot 10^0$	$9,497 \cdot 10^{-1}$	$4,903 \cdot 10^{-1}$
0,02	9,802	3,355	9,131	4,810
0,03	9,704	2,959	8,817	4,720
0,04	9,608	2,681	8,535	4,633
0,05	$9,512 \cdot 10^{-1}$	$2,468 \cdot 10^0$	$8,278 \cdot 10^{-1}$	$4,549 \cdot 10^{-1}$
0,06	9,418	2,295	8,040	4,468
0,07	9,324	2,151	7,818	4,388
0,08	9,231	2,027	7,610	4,311
0,09	9,139	1,919	7,412	4,236
0,10	$9,048 \cdot 10^{-1}$	$1,823 \cdot 10^0$	$7,225 \cdot 10^{-1}$	$4,163 \cdot 10^{-1}$
0,11	8,958	1,737	7,048	4,092
0,12	8,869	1,660	6,878	4,022
0,13	8,781	1,589	6,715	3,954
0,14	8,694	1,524	6,560	3,888
0,15	$8,607 \cdot 10^{-1}$	$1,464 \cdot 10^0$	$6,410 \cdot 10^{-1}$	$3,823 \cdot 10^{-1}$
0,16	8,521	1,409	6,267	3,759
0,17	8,437	1,358	6,128	3,697
0,18	8,353	1,310	5,995	3,637
0,19	8,270	1,265	5,866	3,577
0,20	$8,187 \cdot 10^{-1}$	$1,223 \cdot 10^0$	$5,742 \cdot 10^{-1}$	$3,519 \cdot 10^{-1}$
0,21	8,106	1,183	5,622	3,463
0,22	8,025	1,145	5,505	3,407
0,23	7,945	1,110	5,393	3,352
0,24	7,866	1,076	5,283	3,299
0,25	$7,788 \cdot 10^{-1}$	$1,044 \cdot 10^0$	$5,177 \cdot 10^{-1}$	$3,247 \cdot 10^{-1}$
0,26	7,710	1,014	5,074	3,196
0,27	7,634	$9,849 \cdot 10^{-1}$	4,974	3,145
0,28	7,558	9,573	4,877	3,096
0,29	7,483	9,309	4,783	3,048
0,30	$7,408 \cdot 10^{-1}$	$9,057 \cdot 10^{-1}$	$4,691 \cdot 10^{-1}$	$3,000 \cdot 10^{-1}$
0,31	7,334	8,815	4,602	2,954
0,32	7,261	8,583	4,515	2,908
0,33	7,189	8,361	4,430	2,864
0,34	7,118	8,147	4,348	2,820
0,35	$7,047 \cdot 10^{-1}$	$7,942 \cdot 10^{-1}$	$4,267 \cdot 10^{-1}$	$2,777 \cdot 10^{-1}$
0,36	6,977	7,745	4,189	2,734
0,37	6,907	7,554	4,112	2,693
0,38	6,839	7,371	4,038	2,652
0,39	6,770	7,194	3,965	2,612
0,40	$6,703 \cdot 10^{-1}$	$7,024 \cdot 10^{-1}$	$3,894 \cdot 10^{-1}$	$2,573 \cdot 10^{-1}$
0,41	6,636	6,859	3,824	2,534
0,42	6,570	6,700	3,756	2,496
0,43	6,505	6,546	3,690	2,459
0,44	6,440	6,397	3,626	2,422
0,45	$6,376 \cdot 10^{-1}$	$6,253 \cdot 10^{-1}$	$3,562 \cdot 10^{-1}$	$2,387 \cdot 10^{-1}$
0,46	6,313	6,114	3,500	2,351

Продолжение табл. П.6

x	e^{-x}	$E_1(x)$	$E_2(x)$	$E_3(x)$
0,47	6,250	5,979	3,440	2,317
0,48	6,188	5,848	3,381	2,282
0,49	6,126	5,721	3,323	2,249
0,50	$6,065 \cdot 10^{-1}$	$5,598 \cdot 10^{-1}$	$3,266 \cdot 10^{-1}$	$2,216 \cdot 10^{-1}$
0,51	6,005	5,478	3,211	2,184
0,52	5,945	5,362	3,157	2,152
0,53	5,886	5,250	3,104	2,120
0,54	5,827	5,140	3,052	2,090
0,55	$5,769 \cdot 10^{-1}$	$5,034 \cdot 10^{-1}$	$3,001 \cdot 10^{-1}$	$2,059 \cdot 10^{-1}$
0,56	5,712	4,930	2,951	2,030
0,57	5,655	4,830	2,902	2,000
0,58	5,599	4,732	2,854	1,972
0,59	5,543	4,636	2,808	1,943
0,60	$5,488 \cdot 10^{-1}$	$4,544 \cdot 10^{-1}$	$2,762 \cdot 10^{-1}$	$1,916 \cdot 10^{-1}$
0,61	5,434	4,454	2,717	1,888
0,62	5,379	4,366	2,673	1,861
0,63	5,326	4,280	2,630	1,835
0,64	5,273	4,196	2,587	1,808
0,65	$5,220 \cdot 10^{-1}$	$4,115 \cdot 10^{-1}$	$2,546 \cdot 10^{-1}$	$1,783 \cdot 10^{-1}$
0,66	5,168	4,036	2,505	1,758
0,67	5,117	3,958	2,465	1,733
0,68	5,066	3,883	2,426	1,708
0,69	5,016	3,810	2,387	1,684
0,70	$4,966 \cdot 10^{-1}$	$3,738 \cdot 10^{-1}$	$2,349 \cdot 10^{-1}$	$1,661 \cdot 10^{-1}$
0,71	4,916	3,668	2,312	1,637
0,72	4,868	3,599	2,276	1,614
0,73	4,819	3,532	2,240	1,592
0,74	4,771	3,467	2,205	1,570
0,75	$4,724 \cdot 10^{-1}$	$3,403 \cdot 10^{-1}$	$2,171 \cdot 10^{-1}$	$1,548 \cdot 10^{-1}$
0,76	4,677	3,341	2,137	1,526
0,77	4,630	3,280	2,104	1,505
0,78	4,584	3,221	2,072	1,484
0,79	4,538	3,163	2,040	1,463
0,80	$4,493 \cdot 10^{-1}$	$3,106 \cdot 10^{-1}$	$2,008 \cdot 10^{-1}$	$1,443 \cdot 10^{-1}$
0,81	4,448	3,050	1,978	1,423
0,82	4,404	2,996	1,948	1,404
0,83	4,360	2,943	1,918	1,384
0,84	4,317	2,891	1,889	1,365
0,85	$4,274 \cdot 10^{-1}$	$2,840 \cdot 10^{-1}$	$1,860 \cdot 10^{-1}$	$1,346 \cdot 10^{-1}$
0,86	4,232	2,790	1,832	1,328
0,87	4,190	2,742	1,804	1,310
0,88	4,148	2,694	1,777	1,292
0,89	4,106	2,647	1,750	1,274
0,90	$4,066 \cdot 10^{-1}$	$2,602 \cdot 10^{-1}$	$1,724 \cdot 10^{-1}$	$1,257 \cdot 10^{-1}$
0,91	4,025	2,557	1,698	1,240
0,92	3,985	2,513	1,673	1,223
0,93	3,946	2,470	1,648	1,206
0,94	3,906	2,428	1,623	1,190
0,95	$3,867 \cdot 10^{-1}$	$2,387 \cdot 10^{-1}$	$1,590 \cdot 10^{-1}$	$1,174 \cdot 10^{-1}$

Продолжение табл. П.6

x	e^{-x}	$E_1(x)$	$E_2(x)$	$E_3(x)$
0,96	3,829	2,347	1,576	1,158
0,97	3,791	2,308	1,552	1,142
0,98	3,753	2,269	1,530	1,127
0,99	3,716	2,231	1,507	1,112
1,00	$3,679 \cdot 10^{-1}$	$2,194 \cdot 10^{-1}$	$1,485 \cdot 10^{-1}$	$1,097 \cdot 10^{-1}$
1,01	3,642	2,157	1,463	1,082
1,02	3,606	2,122	1,442	1,068
1,03	3,570	2,087	1,421	1,053
1,04	3,534	2,052	1,400	1,039
1,05	$3,499 \cdot 10^{-1}$	$2,019 \cdot 10^{-1}$	$1,380 \cdot 10^{-1}$	$1,025 \cdot 10^{-1}$
1,06	3,464	1,986	1,360	1,012
1,07	3,430	1,953	1,340	$9,981 \cdot 10^{-2}$
1,08	3,396	1,922	1,321	9,848
1,09	3,362	1,890	1,302	9,717
1,10	$3,329 \cdot 10^{-1}$	$1,860 \cdot 10^{-1}$	$1,283 \cdot 10^{-1}$	$9,589 \cdot 10^{-2}$
1,11	3,296	1,830	1,264	9,461
1,12	3,263	1,800	1,246	9,335
1,13	3,230	1,772	1,228	9,211
1,14	3,198	1,743	1,211	9,090
1,15	$3,166 \cdot 10^{-1}$	$1,716 \cdot 10^{-1}$	$1,193 \cdot 10^{-1}$	$8,969 \cdot 10^{-2}$
1,16	3,135	1,688	1,176	8,851
1,17	3,104	1,662	1,160	8,734
1,18	3,073	1,635	1,143	8,619
1,19	3,042	1,609	1,127	8,505
1,20	$3,012 \cdot 10^{-1}$	$1,584 \cdot 10^{-1}$	$1,111 \cdot 10^{-1}$	$8,393 \cdot 10^{-2}$
1,21	2,982	1,559	1,095	8,283
1,22	2,952	1,535	1,080	8,174
1,23	2,923	1,511	1,065	8,067
1,24	2,894	1,487	1,050	7,961
1,25	$2,865 \cdot 10^{-1}$	$1,464 \cdot 10^{-1}$	$1,035 \cdot 10^{-1}$	$7,857 \cdot 10^{-2}$
1,26	2,836	1,441	1,020	7,754
1,27	2,808	1,419	1,006	7,653
1,28	2,780	1,397	9,920 $\cdot 10^{-2}$	7,553
1,29	2,753	1,376	9,781	7,455
1,30	$2,725 \cdot 10^{-1}$	$1,354 \cdot 10^{-1}$	$9,644 \cdot 10^{-2}$	$7,358 \cdot 10^{-2}$
1,31	2,698	1,334	9,510	7,262
1,32	2,671	1,313	9,378	7,167
1,33	2,645	1,293	9,247	7,074
1,34	2,618	1,274	9,119	6,982
1,35	$2,592 \cdot 10^{-1}$	$1,254 \cdot 10^{-1}$	$8,993 \cdot 10^{-2}$	$6,892 \cdot 10^{-2}$
1,36	2,567	1,235	8,868	6,803
1,37	2,541	1,216	8,746	6,714
1,38	2,516	1,198	8,625	6,628
1,39	2,491	1,180	8,506	6,542
1,40	$2,466 \cdot 10^{-1}$	$1,162 \cdot 10^{-1}$	$8,389 \cdot 10^{-2}$	$6,458 \cdot 10^{-2}$
1,41	2,441	1,145	8,274	6,374
1,42	2,417	1,128	8,160	6,292
1,43	2,393	1,111	8,048	6,211
1,44	2,369	1,094	7,938	6,131

Продолжение табл. П.6

x	e^{-x}	$E_1(x)$	$E_2(x)$	$E_3(x)$
1,45	$2,346 \cdot 10^{-1}$	$1,078 \cdot 10^{-1}$	$7,829 \cdot 10^{-2}$	$6,052 \cdot 10^{-2}$
1,46	2,322	1,062	7,722	5,974
1,47	2,299	1,046	7,617	5,898
1,48	2,276	1,030	7,513	5,822
1,49	2,254	1,015	7,411	5,748
1,50	$2,231 \cdot 10^{-1}$	$1,000 \cdot 10^{-1}$	$7,310 \cdot 10^{-2}$	$5,674 \cdot 10^{-2}$
1,51	2,209	$9,854 \cdot 10^{-2}$	7,211	5,601
1,52	2,187	9,709	7,113	5,530
1,53	2,165	9,567	7,017	5,459
1,54	2,144	9,426	6,922	5,389
1,55	$2,122 \cdot 10^{-1}$	$9,288 \cdot 10^{-2}$	$6,828 \cdot 10^{-2}$	$5,321 \cdot 10^{-2}$
1,56	2,101	9,152	6,736	5,253
1,57	2,080	9,019	6,645	5,186
1,58	2,060	8,887	6,555	5,120
1,59	2,039	8,758	6,467	5,055
1,60	$2,019 \cdot 10^{-1}$	$8,631 \cdot 10^{-2}$	$6,380 \cdot 10^{-2}$	$4,990 \cdot 10^{-2}$
1,61	1,999	8,506	6,295	4,927
1,62	1,979	8,382	6,210	4,865
1,63	1,959	8,261	6,127	4,803
1,64	1,940	8,142	6,045	4,742
1,65	$1,920 \cdot 10^{-1}$	$8,025 \cdot 10^{-2}$	$5,964 \cdot 10^{-2}$	$4,682 \cdot 10^{-2}$
1,66	1,901	7,909	5,884	4,623
1,67	1,882	7,796	5,806	4,564
1,68	1,864	7,684	5,728	4,507
1,69	1,845	7,574	5,652	4,450
1,70	$1,827 \cdot 10^{-1}$	$7,465 \cdot 10^{-2}$	$5,577 \cdot 10^{-2}$	$4,394 \cdot 10^{-2}$
1,71	1,809	7,359	5,503	4,338
1,72	1,791	7,254	5,430	4,284
1,73	1,773	7,151	5,358	4,230
1,74	1,755	7,049	5,287	4,176
1,75	$1,738 \cdot 10^{-1}$	$6,949 \cdot 10^{-2}$	$5,217 \cdot 10^{-2}$	$4,124 \cdot 10^{-2}$
1,76	1,720	6,850	5,148	4,072
1,77	1,703	6,753	5,080	4,021
1,78	1,686	6,658	5,013	3,970
1,79	1,670	6,654	4,947	3,921
1,80	$1,653 \cdot 10^{-1}$	$6,471 \cdot 10^{-2}$	$4,882 \cdot 10^{-2}$	$3,872 \cdot 10^{-2}$
1,81	1,636	6,380	4,817	3,823
1,82	1,620	6,290	4,754	3,775
1,83	1,604	6,202	4,691	3,728
1,84	1,588	6,115	4,630	3,681
1,85	$1,572 \cdot 10^{-1}$	$6,029 \cdot 10^{-2}$	$4,569 \cdot 10^{-2}$	$3,635 \cdot 10^{-2}$
1,86	1,557	5,945	4,509	3,590
1,87	1,541	5,862	4,450	3,545
1,88	1,526	5,780	4,392	3,501
1,89	1,511	5,700	4,335	3,457
1,90	$1,496 \cdot 10^{-1}$	$5,620 \cdot 10^{-2}$	$4,278 \cdot 10^{-2}$	$3,414 \cdot 10^{-2}$
1,91	1,481	5,542	4,222	3,372
1,92	1,466	5,465	4,167	3,330
1,93	1,451	5,390	4,113	3,288

Продолжение табл. П.6

x	e^{-x}	$E_1(x)$	$E_2(x)$	$E_3(x)$
1,94	1,437	5,315	4,059	3,248
1,95	$1,423 \cdot 10^{-1}$	$5,241 \cdot 10^{-2}$	$4,007 \cdot 10^{-2}$	$3,207 \cdot 10^{-2}$
1,96	1,408	5,169	3,954	3,167
1,97	1,394	5,098	3,903	3,128
1,98	1,381	5,027	3,852	3,089
1,99	1,367	4,958	3,803	3,051
2,0	$1,353 \cdot 10^{-1}$	$4,890 \cdot 10^{-2}$	$3,753 \cdot 10^{-2}$	$3,013 \cdot 10^{-2}$
2,1	1,224	4,261	3,297	2,661
2,2	1,108	3,719	2,898	2,352
2,3	1,002	3,250	2,550	2,080
2,4	$9,072 \cdot 10^{-2}$	2,844	2,246	1,840
2,5	$8,208 \cdot 10^{-2}$	$2,491 \cdot 10^{-2}$	$1,980 \cdot 10^{-2}$	$1,630 \cdot 10^{-2}$
2,6	7,427	2,185	1,746	1,443
2,7	6,720	1,918	1,541	1,279
2,8	6,081	1,686	1,361	1,134
2,9	5,502	1,482	1,203	1,006
3,0	$4,979 \cdot 10^{-2}$	$1,305 \cdot 10^{-2}$	$1,064 \cdot 10^{-2}$	$8,931 \cdot 10^{-3}$
3,1	4,505	1,149	$9,416 \cdot 10^{-3}$	7,929
3,2	4,076	1,013	8,337	7,042
3,3	3,688	$8,939 \cdot 10^{-3}$	7,384	6,257
3,4	3,337	7,891	6,544	5,562
3,5	$3,020 \cdot 10^{-2}$	$6,970 \cdot 10^{-3}$	$5,802 \cdot 10^{-3}$	$4,945 \cdot 10^{-3}$
3,6	2,732	6,160	5,146	4,399
3,7	2,472	5,448	4,566	3,914
3,8	2,237	4,820	4,054	3,483
3,9	2,024	4,267	3,600	3,101
4,0	$1,832 \cdot 10^{-2}$	$3,779 \cdot 10^{-3}$	$3,198 \cdot 10^{-3}$	$2,761 \cdot 10^{-3}$
4,1	1,657	3,349	2,842	2,460
4,2	1,500	2,969	2,527	2,191
4,3	1,357	2,633	2,247	1,953
4,4	1,228	2,336	1,999	1,741
4,5	$1,111 \cdot 10^{-2}$	$2,073 \cdot 10^{-3}$	$1,779 \cdot 10^{-3}$	$1,552 \cdot 10^{-3}$
4,6	1,005	1,841	1,583	1,384
4,7	$9,095 \cdot 10^{-3}$	1,635	1,410	1,235
4,8	8,230	1,453	1,255	1,102
4,9	7,446	1,291	1,118	$9,834 \cdot 10^{-4}$
5,0	$6,738 \cdot 10^{-3}$	$1,148 \cdot 10^{-3}$	$9,965 \cdot 10^{-4}$	$8,778 \cdot 10^{-4}$
5,1	6,097	1,021	8,881	7,837
5,2	5,516	$9,086 \cdot 10^{-4}$	7,917	6,998
5,3	4,992	8,086	7,060	6,250
5,4	4,516	7,198	6,296	5,583
5,5	$4,087 \cdot 10^{-3}$	$6,409 \cdot 10^{-4}$	$5,617 \cdot 10^{-4}$	$4,988 \cdot 10^{-4}$
5,6	3,698	5,708	5,012	4,457
5,7	3,346	5,086	4,472	3,983
5,8	3,028	4,532	3,992	3,560
5,9	2,739	4,039	3,564	3,183
6,0	$2,479 \cdot 10^{-3}$	$3,601 \cdot 10^{-4}$	$3,183 \cdot 10^{-4}$	$2,846 \cdot 10^{-4}$
6,1	2,243	3,211	2,842	2,545
6,2	2,029	2,864	2,539	2,276

x	e^{-x}	$E_1(x)$	$E_2(x)$	$E_3(x)$
6,3	1,836	2,555	2,268	2,036
6,4	1,662	2,280	2,027	1,822
6,5	$1,503 \cdot 10^{-3}$	$2,034 \cdot 10^{-4}$	$1,812 \cdot 10^{-4}$	$1,630 \cdot 10^{-4}$
6,6	1,360	1,816	1,619	1,459
6,7	1,231	1,621	1,448	1,306
6,8	1,114	1,448	1,294	1,168
6,9	1,008	1,293	1,157	1,046
7,0	$9,119 \cdot 10^{-4}$	$1,155 \cdot 10^{-4}$	$1,035 \cdot 10^{-4}$	$9,366 \cdot 10^{-5}$
7,1	8,251	1,032	$9,259 \cdot 10^{-5}$	8,386
7,2	7,466	$9,219 \cdot 10^{-5}$	8,283	7,510
7,3	6,755	8,239	7,411	6,726
7,4	6,112	7,364	6,632	6,025
7,5	$5,531 \cdot 10^{-4}$	$6,583 \cdot 10^{-5}$	$5,935 \cdot 10^{-5}$	$5,397 \cdot 10^{-5}$
7,6	5,004	5,886	5,312	4,835
7,7	4,528	5,263	4,756	4,332
7,8	4,097	4,707	4,258	3,882
7,9	3,707	4,210	3,812	3,479
8,0	$3,355 \cdot 10^{-4}$	$3,767 \cdot 10^{-5}$	$3,414 \cdot 10^{-5}$	$3,118 \cdot 10^{-5}$
8,1	3,035	3,370	3,057	2,795
8,2	2,746	3,016	2,738	2,505
8,3	2,485	2,699	2,453	2,246
8,4	2,249	2,415	2,198	2,014
8,5	$2,035 \cdot 10^{-4}$	$2,162 \cdot 10^{-5}$	$1,969 \cdot 10^{-5}$	$1,806 \cdot 10^{-5}$
8,6	1,841	1,936	1,764	1,619
8,7	1,666	1,733	1,581	1,452
8,8	1,507	1,552	1,417	1,302
8,9	1,364	1,390	1,270	1,168
9,0	$1,234 \cdot 10^{-4}$	$1,245 \cdot 10^{-5}$	$1,138 \cdot 10^{-5}$	$1,048 \cdot 10^{-5}$
9,1	1,117	1,115	1,021	$9,400 \cdot 10^{-6}$
9,2	1,010	$9,988 \cdot 10^{-6}$	$9,149 \cdot 10^{-6}$	8,434
9,3	$9,142 \cdot 10^{-5}$	8,948	8,203	7,567
9,4	8,272	8,018	7,356	6,790
9,5	$7,485 \cdot 10^{-5}$	$7,185 \cdot 10^{-6}$	$6,596 \cdot 10^{-6}$	$6,093 \cdot 10^{-6}$
9,6	6,773	6,439	5,916	5,468
9,7	6,128	5,771	5,306	4,907
9,8	5,545	5,173	4,760	4,404
9,9	5,017	4,637	4,270	3,953
10,0	$4,540 \cdot 10^{-5}$	$4,157 \cdot 10^{-6}$	$3,830 \cdot 10^{-6}$	$3,549 \cdot 10^{-6}$
10,5	2,754	2,410	2,228	
11,0	1,670	1,400	1,298	
11,5	1,013	$8,150 \cdot 10^{-7}$	$7,578 \cdot 10^{-7}$	
12,0	$6,144 \cdot 10^{-6}$	4,751	4,429	
12,5	$3,727 \cdot 10^{-6}$	$2,774 \cdot 10^{-7}$	$2,592 \cdot 10^{-7}$	
13,0	2,260	1,622	1,519	
13,5	1,371	$9,495 \cdot 10^{-8}$	$8,912 \cdot 10^{-8}$	
14,0	$8,315 \cdot 10^{-7}$	5,565	5,234	
14,5	5,043	3,266	3,077	
15,0	3,059	1,920	1,810	

Функции интегрального секанса (интегралы Зиверта)

$$F(\theta, \mu d) = \operatorname{sech}(\mu d, \theta) = \int_0^\theta e^{-\mu d \operatorname{sech} x} dx$$

θ , град	μd					
	0,5	1,0	2,0	3,0	4,0	5,0
2	$2,117 \cdot 10^{-2}$	$1,283 \cdot 10^{-2}$	$4,720 \cdot 10^{-3}$	$1,736 \cdot 10^{-3}$	$6,387 \cdot 10^{-4}$	$2,338 \cdot 10^{-4}$
4	4,232	2,565	9,429	3,465	$1,274 \cdot 10^{-3}$	4,659
6	6,345	3,844	$1,412 \cdot 10^{-2}$	5,182	1,900	6,962
8	8,453	5,118	1,877	6,879	2,520	9,231
10	$1,056 \cdot 10^{-1}$	6,385	2,337	8,552	3,127	$1,143 \cdot 10^{-3}$
12	1,265	7,646	2,792	$1,019 \cdot 10^{-2}$	3,720	1,356
14	1,474	8,896	3,240	1,180	4,296	1,562
16	1,682	$1,014 \cdot 10^{-1}$	3,680	1,336	4,851	1,759
18	1,889	1,136	4,111	1,487	5,384	1,946
20	2,095	1,257	4,531	1,633	5,891	2,122
22	2,299	1,377	4,941	1,773	6,373	2,286
24	2,502	1,495	5,338	1,907	6,825	2,438
26	2,703	1,610	5,722	2,035	7,247	2,577
28	2,902	1,724	6,092	2,155	7,640	2,705
30	3,099	1,835	6,447	2,268	8,001	2,820
32	3,294	1,944	6,785	2,373	8,363	2,923
34	3,486	2,050	7,107	2,471	8,658	3,014
36	3,676	2,153	7,410	2,560	8,922	3,092
38	3,862	2,252	7,695	2,638	9,154	3,160
40	4,046	2,349	7,961	2,712	9,356	3,218
42	4,226	2,441	8,206	2,777	9,531	3,265
44	4,402	2,530	8,432	2,835	9,677	3,303
46	4,574	2,615	8,639	2,885	9,799	3,333
48	4,741	2,696	8,826	2,928	9,900	3,356
50	4,904	2,772	8,992	2,964	9,977	3,373
52	5,062	2,843	9,138	2,993	$1,004 \cdot 10^{-2}$	3,385
54	5,214	2,909	9,263	3,018	1,008	3,394
56	5,360	2,970	9,372	3,037	1,012	3,398
58	5,499	3,026	9,461	3,051	1,014	3,399
60	5,631	3,076	9,533	3,061	1,015	3,399
62	5,755	3,120	9,589	3,069	1,016	3,399
64	5,871	3,159	9,632	3,074	1,017	3,399
66	5,978	3,192	9,663	3,077	1,017	3,399
68	6,075	3,219	9,684	3,078	1,017	3,399
70	6,161	3,240	9,698	3,079	1,017	3,399
72	6,236	3,256	9,706	3,079	1,017	3,399
74	6,299	3,268	9,709	3,080	1,017	3,399
76	6,350	3,275	9,710	3,080	1,017	3,399
78	6,388	3,279	9,711	3,080	1,017	3,399
80	6,413	3,281	9,711	3,080	1,017	3,399
82	6,428	3,282	9,711	3,080	1,017	3,399
84	6,434	3,282	9,711	3,080	1,017	3,399
86	6,436	3,282	9,711	3,080	1,017	3,399
88	6,436	3,282	9,711	3,080	1,017	3,399
90	6,436	3,282	9,711	3,080	1,017	3,399

θ, град	μd						
	6,0	7,0	8,0	9,0	10,0	12,0	14,0
2	8,725 × 10 ⁻⁵	3,141 × 10 ⁻⁵	1,168 × 10 ⁻⁵	4,296 × 10 ⁻⁶	1,579 × 10 ⁻⁶	2,136 × 10 ⁻⁷	2,890 × 10 ⁻⁸
4	1,727 × 10 ⁻⁴	6,282	2,324	8,545	3,140	4,240	5,732
6	2,565	9,423	3,458	1,270 × 10 ⁻⁵	4,662	6,284	8,477
8	2,385	1,256 × 10 ⁻⁴	4,559	1,672	6,129	8,241	1,108 × 10 ⁻⁷
10	4,188	1,553	5,618	2,057	7,527	1,007 × 10 ⁻⁶	1,352
12	4,973	1,832	6,625	2,420	8,839	1,176	1,575
14	5,724	2,094	7,572	2,760	1,006 × 10 ⁻⁵	1,332	1,776
16	6,422	2,338	8,458	3,073	1,117	1,472	1,953
18	7,067	2,565	9,271	3,359	1,217	1,596	2,106
20	7,678	2,774	1,001 × 10 ⁻⁴	3,615	1,306	1,704	2,235
22	8,236	2,966	1,068	3,842	1,384	1,795	2,343
24	8,742	3,123	1,126	4,040	1,451	1,871	2,426
26	9,214	3,281	1,177	4,209	1,507	1,934	2,490
28	9,632	3,420	1,221	4,352	1,554	1,983	2,543
30	9,999	3,542	1,260	4,471	1,592	2,022	2,582
32	1,031 × 10 ⁻³	3,630	1,293	4,467	1,622	2,051	2,611
34	1,057	3,717	1,318	4,645	1,645	2,073	2,630
36	1,080	3,787	1,339	4,707	1,663	2,088	2,644
38	1,099	3,839	1,355	4,753	1,676	2,098	2,653
40	1,115	3,874	1,368	4,786	1,685	2,159	2,659
42	1,127	3,907	1,376	4,809	1,691	2,203	2,662
44	1,136	3,931	1,383	4,825	1,695	2,230	2,664
46	1,143	3,949	1,387	4,836	1,698	2,246	2,665
48	1,148	3,962	1,390	4,843	1,699	2,254	2,665
50	1,152	3,970	1,392	4,846	1,700	2,258	2,665
52	1,154	3,975	1,393	4,849	1,701	2,261	2,665
54	1,156	3,978	1,394	4,850	1,701	2,261	2,665
56	1,157	3,980	1,394	4,850	1,701	2,262	2,665
58	1,158	3,981	1,394	4,851	1,701	2,262	2,665
60° ≤ θ ≤ 90°	1,158	3,982	1,394	4,851	1,701	2,262	2,665

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Излучения** ионизирующие и их измерения. Термины и определения. ГОСТ 15484—81. М.: Изд-во стандартов, 1981.
2. **Единицы** физических величин. Стандарт СЭВ СТ СЭВ 1052—78. М.: Изд-во стандартов, 1980.
3. **Единицы** физических величин. ГОСТ 8.417—81 (СТ СЭВ 1052—78). М.: Изд-во стандартов, 1981.
4. **Методические** указания. Внедрение и применение СТ СЭВ 1052—78 «Метрология. Единицы физических величин». РД 50—160—79. М.: Изд-во стандартов, 1979.
5. **Методические** указания. Внедрение и применение ГОСТ 8.417—81 «ГСИ. Единицы физических величин» в области ионизирующих излучений. РД 50—454—84. М.: Изд-во стандартов, 1984; 1990, с изменениями.
6. **Иванов В. И., Машкович В. П., Центр Э. М.** Международная система единиц (СИ) в атомной науке и технике. Справочное руководство. М.: Энергоиздат, 1981.
7. Chilton A. B., Shultis J. K., Faw R. E. Principles of Radiation Shielding. Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, New Jersey, 1984.
8. **Иванов В. И.** Курс дозиметрии. 4-е изд., перераб. и доп. М.: Энергоатомиздат, 1988.
9. **Гусев Н. Г., Климанов В. А., Машкович В. П., Суворов А. П.** Защита от ионизирующих излучений. Т. 1. Физические основы защиты. Под ред. Н. Г. Гусева. 3-е изд., перераб. и доп. М.: Энергоатомиздат, 1989.
10. **Нормы** радиационной безопасности НРБ-76/87 и Основные санитарные правила работы с радиоактивными веществами и другими источниками ионизирующих излучений ОСП-72/87. 3-е изд., перераб. и доп. М.: Энергоатомиздат, 1988.
11. **Радиационные** величины и единицы. Доклад 33 МКРЕ: Пер. с англ./Под ред. И. Б. Кеирим-Маркуса. М.: Энергоатомиздат, 1985.
12. **Бурдун Г. Д.** Справочник по Международной системе единиц. 3-е изд. М.: Изд-во стандартов, 1980.
13. **Моисеев А. А.** Таблицы перевода единиц основных дозиметрических и радиационных величин. Справочник. М.: Энергоатомиздат, 1986.
14. Profio A. E. Radiation Shielding and Dosimetry. New York: Wiley Interscience, 1979.
15. Reactor Shielding for Nuclear Engineers. N.M. Schaeffer, Ed. Oak Ridge, Tennessee, US AEC, May 1973.
16. Average Energy Required to Produce an Ion Pair. Report N 31. ICRU. Washington, D.C., 1979.
17. Direct reading, personal dose equivalent and/or dose equivalent rate monitors for x, gamma and high energy beta radiation. Technical committee N 45: Nuclear Instrumentation, April 1988.
18. Direct reading personal dose equivalent and/or dose equivalent rate monitors for neutron radiation. Technical committee N 45: Nuclear Instrumentation, April 1988.

19. Измерители эквивалентной дозы и мощности эквивалентной дозы бета, рентгеновского и гамма-излучений, используемых для целей радиационной защиты. Международная электротехническая комиссия. Технический комитет № 45 «Ядерное приборостроение», июль 1985.

20. Data for Protection against Ionizing Radiation from External Sources: Supplement to ICRP Publication 15. ICRP Publication 21, International Commission on Radiological Protection, Pergamon Elmsford, N.Y., 1973.

21. Тканевые дозы нейтронов в теле человека/В. Г. Золотухин, И. Б. Кеирим-Маркус, О. А. Кочетков и др. Справочник. М.: Атомиздат, 1972.

22. Snyder W. S., Neufeld J.//Radiation Rev. 1957. V. 6. N 1. P. 67.

23. Auxier J. A., Snyder W. S., Jones J. D.//In: Radiation Dosimetry. V. 1, Ch. 6. F.H. Attix, W. C. Roesch, Ed. New York: Academic Press, Inc., 1968.

24. Prêtre S. Neutron Depth Doses in Man and Corresponding Quality Factor. FBM-70—16, 1971.

25. Ritts J. J., Solomito E., Stevens P. N. Calculation of Neutron Fluence-to-Kerma Factors for Human Body. US AEC. Report ORNL-TM-2079. ORNL. January 1968.

26. Henderson B. J. Conversion of Neutron or Gamma-Ray Flux to Absorbed Dose Rate. US AEC, Report XDC-59-8-179. General Electric Company, Aug. 14, 1959.

27. Claiborn H. C., Trubey D. K.//Nucl. Appl. Technol. 1970. V. 8. N 5. P. 450.

28. Переносные измерители мощности эквивалентной дозы поля нейтронов для целей радиационной защиты. Международная электротехническая комиссия. Технический комитет № 45 «Ядерное приборостроение», май 1987.

29. Rogers D.//Health Phys. 1984. V. 46. P. 891.

30. Голиков В. Ю., Барковский А. Н., Лихтарев И. А.//Атомная энергия. 1989. Т. 67. Вып. 5. С. 341.

31. Unger L. M., Trubey D. K. Specific Gamma-Ray Dose Constants for Nuclides Important to Dosimetry and Radiological Assessment. ORNL/RSIC-Report 45/R1, May 1982.

32. Hubbell J. H. Photon Cross Sections, Attenuation Coefficients and Energy Absorption Coefficients from 10 keV to 100 GeV. NSRDS-NBS, N 29, US Government Printing Office, Washington, D.C. 20402, 1969.

33. Metghalchi M.//Proceedings of the sixth international conference on radiation shielding. May 16—20, 1983. Tokyo, Japan, JAERI, 1983. Vol. 1. P. 1236.

34. Гусев Н. Г., Машкович В. П., Вербицкий Б. В. Радиоактивные изотопы как гамма-излучатели. М.: Атомиздат, 1964.

35. Гусев Н. Г., Дмитриев П. П. Квантовое излучение радиоактивных нуклидов. Справочник. М.: Атомиздат, 1977.

36. Схемы распада радионуклидов. Энергия и интенсивность излучения. Публикация 38 МКРЗ. В двух частях. Под ред. А. А. Моисеева. М.: Энергоатомиздат, 1987.

37. Гусев Н. Г., Дмитриев П. П. Радиоактивные цепочки. Справочник. М.: Энергоатомиздат, 1988.

38. Бета и антинейтринное излучение радиоактивных ядер//В. Г. Алексанкин, С. В. Родичев, П. М. Рубцов и др. Справочник/Под ред. П. М. Рубцова. М.: Энергоатомиздат, 1989.

39. Wyard S. J.//Nucleonics. 1955. V. 13. N. 7. P. 44.

40. Rester D. H., Dance W. E.//J. of Appl. Phys. 1970. V. 41. N 6. P. 2682.

41. Баранов В. Ф., Наркевич Б. Я., Павловский О. А., Смирнов В. В.//Вопросы дозиметрии и защиты от излучений. Вып. 7/Под ред. Л. Р. Кимеля. М.: Атомиздат, 1967. С. 41.

42. Интегральные эксперименты в проблеме переноса ионизирующих излучений/И. В. Горячев, Ю. И. Колеватов, В. П. Семенов, Л. А. Трыков. Справочник/Под ред. Л. А. Трыкова. М.: Энергоатомиздат, 1985.

43. Экспериментальная ядерная физика. Под ред. Э. Сэгре. Т. II. Пер. с англ. М.: Изд-во иностр. лит., 1955.

44. Бекурц К., Виртц К. Нейтронная физика: Пер. с англ./Под ред. Л. М. Микаэляна, В. И. Лебедева. М.: Атомиздат, 1968.

45. Кимель Л. Р., Машкович В. П., Панченко А. М.//Приборы и методы анализа излучений. Вып. 3/Под ред. Е. Л. Столяровой. М.: Госатомиздат, 1962. С. 71.

46. Гольдштейн Г. Основы защиты реакторов: Пер. с англ./Под ред. Н. И. Лалетина. М.: Госатомиздат, 1961.

47. Абрамов А. И., Казанский Ю. А., Матусевич Е. С. Основы экспериментальных методов ядерной физики. М.: Энергоатомиздат, 1970.

48. Гусев Н. Г., Машкович В. П., Обвинцев Г. В. Гамма-излучение радиоактивных изотопов и продуктов деления. М.: Физматгиз, 1958.

49. Гусев Н. Г. Защита от гамма-излучения продуктов деления. Справочник. М.: Атомиздат, 1968.

50. Грешилов А. А., Колобашкин В. М., Дементьев С. И. Продукты мгновенного деления ^{235}U , ^{238}U , ^{239}Pu в интервале 0—1 ч. М.: Атомиздат, 1969.

51. Гусев Н. Г., Рубцов П. М., Коваленко В. В., Колобашкин В. М. Радиационные характеристики продуктов деления. Справочник. М.: Атомиздат, 1974.

52. Колобашкин В. М., Рубцов П. М., Ружанский П. А., Сидоренко В. Д. Радиационные характеристики облученного ядерного топлива. Справочник. М.: Энергоатомиздат, 1983.

53. Рубцов П. М., Ружанский П. А., Сидоренко В. Д. Радиационные характеристики облученного топлива ядерных реакторов. М.: Энергоатомиздат, 1995, в печати.

54. Дозовые зависимости нестохастических эффектов, основные концепции и величины, используемые в МКРЗ. Публикации 41, 42 МКРЗ: Пер. с англ. М.: Энергоатомиздат, 1987.

55. Алексахин Р. М. Ядерная энергия и биосфера. М.: Энергоатомиздат, 1982.

56. Ярмоненко С. П. Радиобиология человека и животных. М.: Высшая школа, 1977.

57. Ядерная энергетика, человек и окружающая среда/Н. С. Бабаев, В. Ф. Демин, Л. А. Ильин и др. Изд. 2-е, перераб. и доп./Под ред. А. П. Александрова. М.: Энергоатомиздат, 1984.

58. Радиация. Дозы, эффекты, риск: Пер. с англ. Ю. А. Банникова. М.: Мир, 1988.

59. Холл Э. Дж. Радиация и жизнь: Пер. с англ./Под ред. Л. А. Ильина, М.: Медицина, 1989.

60. Крисюк Э. М. Радиационный фон помещений. М.: Энергоатомиздат, 1989.

61. Принципы нормирования облучения населения от естественных источников ионизирующих излучений. Публикация 39 МКРЗ: Пер. с англ./Под ред. А. А. Моисеева, Р. М. Алексахина. М.: Энергоатомиздат, 1986.

62. Горшков Г. В. Гамма-излучение радиоактивных тел. Изд. ЛГУ, 1956.

63. Защита ядерных реакторов. Под ред. Т. Роквелла/Пер. с англ. Под ред. С. Г. Цыпина. М.: Изд-во иностр. лит., 1958.

64. Горшков Г. В. Гамма-излучение радиоактивных тел и элементы расчета защиты от излучений. М.—Л.: Изд-во АН СССР, 1959.

65. Гусев Н. Г., Ковалев Е. Е., Осанов Д. П., Попов В. И. Защита от излучений протяженных источников. М.: Госатомиздат, 1961.

66. Бергельсон Б. Р., Зориков Г. А. Справочник по защите от излучения протяженных источников. М.: Атомиздат, 1965.

67. Биологическая защита ядерных реакторов. Справочник: Пер. с англ./Под ред. Ю. А. Егорова. М.: Атомиздат, 1965.

68. Прохождение излучений через неоднородности в защите/В. Г. Золотухин, В. А. Климанов, О. И. Лейпунский и др. Под ред. О. И. Лейпунского, В. П. Машковича. М.: Атомиздат, 1968.

69. Руководство по радиационной защите для инженеров. Том 2. Пер. с англ./Под ред. Д. Л. Бродера и др. М.: Атомиздат, 1973.

70. Кимель Л. Р.//Приборы и методы анализа излучений. Вып. 2/Под ред. Е. Л. Столяровой. М.: Атомиздат, 1960. С. 47.

71. **Машкович В. П.**//Вопросы дозиметрии и защиты от излучений. Вып. 1/ Под ред. В. И. Иванова. М.: Госатомиздат, 1962. С. 24.
72. **Физические** исследования защиты реакторов/Ю. А. Казанский, В. И. Кухтевич, Е. С. Матусевич и др./Под ред. С. Г. Цыпина. М.: Атомиздат, 1966.
73. **Осанов Д. П., Ковалев Е. Е.** Защита от гамма-излучения источников цилиндрической формы. М.: Атомиздат, 1968.
74. **Иванов В. И., Машкович В. П.** Сборник задач по дозиметрии и защите от ионизирующих излучений. 3-е изд. М.: Атомиздат, 1980.
75. Hubbell J. H.//Radiation Research, 1977. V. 70. P. 58—81.
76. **Сторм Э., Исраэль Х.** Сечения взаимодействия гамма-излучения (для энергий 0,001—100 МэВ и элементов с 1 по 100). Справочник: Пер. с англ. В. А. Климанова, Е. Д. Чистова. М.: Атомиздат, 1973.
77. Storm E., Israel H. J. Photon Cross Sections from 1 keV to 100 MeV for Elements Z=1 to Z=100//Nucl. Data Tables. 1970. Vol. A7. P. 555.
78. **Руководство** по радиационной защите для инженеров. Том 1. Сокращен. пер. с англ./Под ред. Д. Л. Бродера и др. М.: Атомиздат, 1972.
79. Hubbell J. H. Photon Cross Sections, Attenuation Coefficients and Energy Absorption Coefficients from 10 keV to 100 GeV. NSRDS-NBS, N 29, US Government Printing Office, Washington, D.C., 20402, 1969.
80. Hubbell J. H. Photon Mass Attenuation and Energy-absorption Coefficients from 1 keV to 20 MeV//Int. J. Appl. Radiat. Isot. 1982. V. 33. P. 1269—1290.
81. Hubbell J. H., Gimm H. A., Overbo I. Pair, Triplet and Total Atomic Cross Sections (and Mass Attenuation Coefficients) for 1 MeV—100 GeV Photons in Elements Z=1 to 100//J. Phys. Chem. Ref. Data. 1980. V. 9. N 4. P. 1023.
82. Hsia-Hua Hsu, Dowdy E.//Nucl. Instrum. Meth. 1983. V. 204. P. 505—509.
83. **Горев В. С., Гузов В. Д., Кожемякин В. А., Шульгович Г. И.**//Атомная энергия. 1986. Т. 61. Вып. 4. С. 283—284.
84. Penkuhn H.//ESIS News letter, 38—39. July—October, 1981. P. 5.
85. **Казанский Ю. А.**//Атомная энергия. 1960. Т. 8. Вып. 5. С. 432.
86. **Казанский Ю. А., Белов С. П., Матусевич Е. С.**//Атомная энергия. 1958. Т. 5. Вып. 4. С. 457.
87. **Ларичев А. В.**//Вопросы физики защиты реакторов. Под ред. Д. Л. Бродера и др. М.: Госатомиздат, 1963. С. 214.
88. **Викторов А. А., Ефименко Б. А., Золотухин В. Г.** и др.//Атомная энергия. 1970. Т. 29. Вып. 4. С. 286.
89. **Викторов А. А.** Поле гамма-излучения на границах среды от источников с произвольным угловым распределением квантов. Канд. диссертация. М., МИФИ, 1970.
90. **Гольдштейн, Уилкинс**//Защита транспортных установок с ядерным двигателем. Пер. с англ./Под ред. В. В. Орлова, С. Г. Цыпина. М.: Изд-во иностр. лит., 1961. С. 212.
91. **Кимель Л. Р.**//Атомная энергия. 1963. Т. 14. Вып. 3. С. 315.
92. **Кимель Л. Р.**//Вопросы дозиметрии и защиты от излучений. Вып. 3. Под ред. В. И. Иванова. М.: Атомиздат, 1964. С. 16.
93. Trubey D. K. A Survey of Empirical Functions Used to Fit Gamma-Ray Build-up Factors. US AEC, Report ORNL-RSIC-10, ORNL, February 1966.
94. **Климанов В. А., Машкович В. П., Подсевалов Ю. Н.**//Атомная энергия. 1967. Т. 22. Вып. 3. С. 288.
95. Krüger F. W.//Kernenergie. 1967. Bd 10. N. 6. S. 194.
96. **Климанов В. А., Машкович В. П., Петров О. Г.**//Вопросы физики защиты реакторов. Вып. 4. Под ред. Д. Л. Бродера и др. М.: Атомиздат, 1969. С. 169.
97. Trubey D. K.//Nucl. Appl. Technol. 1970. V. 9. P. 441.
98. **Бродер Д. Л., Козловский С. А., Куликов В. И.** и др.//Радиационная безопасность и защита АЭС. Вып. 1/Под ред. Ю. А. Егорова и др. М.: Атомиздат, 1975. С. 170.
99. Morris E. E., Chilton A. B., Vetter A. F.//Nucl. Sci. Engng. 1975. V. 56. N 2. P. 171.
100. Eisenhauer C. M., Simmons G. L.//Nucl. Sci. Engng. 1975. V. 56. N 3. P. 263—270.
101. Shure K., Wallace O. J.//Nucl. Sci. Engng. 1977. V. 62. P. 736—770.
102. Chilton A. B.//Nucl. Sci. Engng. 1977. V. 64. N 3. P. 799.
103. John K., Gopinath D.//Radiation Physics. NBS Special Publication 461. US Department of Commerce. January 1977. P. 174.
104. Metghalchi M.//Nucl. Sci. Engng. 1978. V. 67. N 3. P. 341.
105. Chilton A. B., Eisenhauer C. M., Simmons C. L.//Nucl. Sci. Engng. 1980. V. 73. N 1. P. 97—107.
106. Fournie E. M., Chilton A. B.//Nucl. Sci. Engng. 1980. V. 76. N 1. P. 66.
107. Foderaro A., Hall R. J.//Nucl. Sci. Engng. 1981. V. 78. R. 74—103.
108. Subbaiah K. V., Natarajan A., Gopinath D. V., Trubey D. K.//Nucl. Sci. Engng. 1982. V. 81. P. 172—195.
109. Takeuchi K., Tanaka S.//Nucl. Sci. Engng. 1984. V. 87. N 4. P. 478—489.
110. Takeuchi K., Tanaka S.//Nucl. Sci. Engng. 1985. V. 90. P. 158—164.
111. Takeuchi K., Tanaka S.//Appl. Radiat. Isot. 1986. V. 37. N 4. P. 283—296.
112. Harima Y., Hirayama H., Ishikawa e. a.//Nucl. Sci. Engng. 1987. V. 96. P. 241—252.
113. Subbaiah K. V., Nataraj//Nucl. Sci. Engng. 1987. V. 96. P. 330—342.
114. Gopinath D. V., Subbaiah K. V., Trubey D. K.//Nucl. Sci. Engng. 1987. V 97. P. 362—373.
115. **Горев В. С., Гузов В. Д., Кожемякин В. А., Шульгович Г. И.**//Атомная энергия. 1987. Т. 63. Вып. 2. С. 144—146.
116. **Бродер Д. Л., Козловский С. А., Кызьюров В. С.** и др. Биологическая защита транспортных реакторных установок. Изд. 2-е, перераб. и доп./Под ред. Д. Л. Бродера. М.: Атомиздат, 1969.
117. **Бродер Д. Л., Каюрин Ю. П., Кутузов А. А.**//Атомная энергия. 1962. Т. 12. Вып. 1. С. 30.
118. **Бродер Д. Л., Каюрин Ю. П., Кутузов А. А.** См. [87]. С. 198.
119. **Каюрин Ю. П., Шалин В. А.**//Вопросы физики защиты реакторов. Вып. 2/Под ред. Д. Л. Бродера и др. М.: Атомиздат, 1966. С. 150.
120. **Бродер Д. Л., Рубанов С. М., Трофимов И. Н.**//Kernenergie. 1970. Bd. 13. N. 13. S. 380.
121. Shindo M. IAEA Technical Reports Series, N 34, 1964.
122. **Викторов А. А., Машкович В. П.**//Вопросы дозиметрии и защиты от излучений. Вып. 12. Под ред. Л. Р. Кимеля. М.: Атомиздат, 1971. С. 107.
123. **Футерменгер В., Шуберт Х., Фогт Х.**//Физические проблемы защиты реакторов/Под ред. А. А. Абагыяна и др. М.: Атомиздат, 1971. С. 197.
124. **Гусев Н. Г.** Справочник по радиоактивным излучениям и защите. М.: Медгиз, 1956.
125. Gussev N. G. Leitfaden für Radioaktivität und Strahlenschutz. Berlin, 1957.
126. **Михайлов Л. М., Арефьева З. С.** Таблицы и номограммы для расчета защиты от гамма-лучей (точечные источники). М.: Медицина, 1965.
127. Fano V.//Nucleonics. 1953. V. 11. P. 55.
128. Ponti C. Photon Attenuation Tables//European Shielding Information Service Newsletter, Ispra, 1974.
129. **Румянцев С. В., Добромислов В. А., Борисов О. И.** Типовые методики радиационной дефектоскопии и защиты. М.: Атомиздат, 1979.
130. **Егер Р.** Дозиметрия и защита от излучений: Пер. с нем./Под ред. Б. М. Исаева. М.: Госатомиздат, 1961.
131. **Брэстрап К. Б., Уикофф Г.О.** Руководство по радиационной защите: Пер. с англ./Под ред. Ф. Г. Кроткова, Ю. В. Сивинцева. М.: Медгиз, 1962.
132. **Румянцев С. В.** Радиационная дефектоскопия. М.: Медгиз, 1962.
133. **Радиационная** защита при использовании источников внешнего ионизирующего излучения в медицине. Рекомендации МКРЗ. Публикация 33. Пер. с англ./Под ред. А. А. Моисеева. М.: Энергоатомиздат, 1985.
134. **Гусев Н. Г., Машкович В. П., Суворов А. П.** Защита от ионизиру-

ших излучений. Том 1. Физические основы защиты/Под общей ред. Н. Г. Гусева. 2-е изд. М.: Атомиздат, 1980.

135. Mughabghab S. F., Divadeenam M., Holden N. E. Neutron cross sections. V. 1. Academic Press, New York, 1983.

136. Schmidt J. J. Neutron Cross Sections for Fast Reactor Materials. Part 11. Graphs. December 1962. (EANDC-E-35U).

137. Mughabghab S. F., Garber D. J. Neutron Cross Sections. V. 1. Resonance Parameters. June 1973. US AEC, BNL.

138. Schmidt F. R. The Attenuation Properties of Concrete for Shielding of Neutrons of Energy Less than 15 MeV. August 1970. US AES, ORNL-RSIC-26.

139. Вторичное излучение в радиационной защите/А. А. Абагян, Н. К. Гасников, А. А. Дубинин и др./Под ред. А. А. Дубинина, М.: Энергоатомиздат, 1983.

140. Радиационный захват нейтронов/Т. С. Беланова, А. В. Игнатьев, А. Б. Пашенко, В. И. Пляскин. Справочник. М.: Энергоатомиздат, 1986.

141. Gryntakis E., Gullen D. E., Mundy G.//Handbook on Nuclear Activation Data. IAEA, Vienna, 1987. P. 199—296.

142. Групповые константы для расчета ядерных реакторов/Л. П. Абагян, Н. О. Базазянц, И. И. Бондаренко, М. Н. Николаев. М.: Атомиздат, 1964.

143. Групповые константы для расчетов реакторов и защиты/Л. П. Абагян, Н. О. Базазянц, М. Н. Николаев, А. М. Цибуля. Справочник. М.: Энергоиздат, 1981.

144. Roussin R. W., Maskewitz B. F., Trubey D. K. The Status of Multigroup Cross-Section Data for Shielding Applications. See [33]. V. 1. P. 89.

145. Таблицы физических величин. Справочник/Под ред. И. К. Кикоина. М.: Атомиздат, 1976.

146. Аронсон, Сертейн, Гольдштейн, Прайсер. См. [90], с. 23.

147. Goldstein H., Mechanic H. Penetration of Neutrons from a Point Fission Source through Beryllium and Beryllium Oxide. NDA-2092-9, June 23, 1958.

148. Спектры быстрых нейтронов за материалами и композициями защит ядерных реакторов/А. П. Веселкин, Ю. А. Егоров, И. Я. Емельянов и др. Атлас. М.: Атомиздат, 1970.

149. Аронсон, Сертейн, Гольдштейн. См. [90], с. 40.

150. Beckurts K. H.//Nucl. Instrum. and Meth. 1961. V. 11. N 1. P. 144.

151. Перенос быстрых нейтронов в плоских защитах/Т. А. Гермогенова, С. Ф. Дегтярева, В. В. Орлов и др. М.: Атомиздат, 1971.

152. Дегтярев С. Ф. и др.//Вопросы физики защиты реакторов. Вып. 3/Под ред. Д. Л. Бродера и др. М.: Атомиздат, 1969. С. 116.

153. Дегтярев С. Ф. и др.//Бюллетень информационного центра по ядерным данным. Вып. 3. М.: Атомиздат, 1966. С. 533.

154. Дегтярев С. Ф. и др.//Атомная энергия. 1968. Т. 24. С. 374.

155. Даруга В. К. и др.//Вопросы физики защиты реакторов. Вып. 4/Под ред. Д. Л. Бродера и др. М.: Атомиздат, 1969. С. 56.

156. Цыпин С. Г. и др.//Вопросы дозиметрии и защиты от излучений. Вып. 7/Под ред. Л. Р. Кимеля. М.: Атомиздат, 1967. С. 5.

157. Горячев И. В. и др.//Вопросы физики защиты реакторов. Вып. 3/Под ред. Д. Л. Бродера и др. М.: Атомиздат, 1969. С. 128.

158. Дегтярев С. Ф., Кухтевич В. И., Суворов А. П. и др.//Атомная энергия. 1966. Т. 21. Вып. 5. С. 392.

159. Дегтярев С. Ф., Староверов В. Б., Тарасов В. В. и др.//Атомная энергия. 1968. Т. 24. Вып. 4. С. 372.

160. Дегтярев С. Ф., Суворов А. П., Тихонов В. К., Цыпин С. Г.//Проблемы защиты от проникающих излучений реакторных установок. Т. 5. Мелекес, СЭВ, 1969. С. 134.

161. Биологическая защита транспортных реакторных установок/Д. Л. Бродер, С. А. Козловский, В. С. Кызьюров и др. 2-е изд., перераб. и доп./Под ред. Д. Л. Бродера. М.: Атомиздат, 1969.

162. Motteff J. The Use of Threshold and Resonance Foils for Neutron Spectrum Determination. Cambridge, England, August 26—29, 1958.

163. Дикарев В. С., Егизаров М. Б., Королев Е. Н., Мадеев В. Г.//Атомная энергия. 1956. Т. 5. С. 136.

164. Бродер Д. Л., Дубровский В. Б., Лавданский П. А. и др.//Атомная энергия. 1966. Т. 21. Вып. 4. С. 293.

165. Бродер Д. Л., Дубровский В. Б., Кулаковский М. Я.//Атомная энергия. 1967. Т. 22. Вып. 2. С. 121.

166. Trubey D. K., Emmett M. B. Some Calculations of the Fast Neutron Distribution in Ordinary Concrete from Point and Plane Isotropic Fission Sources. ORNL-RSIC-4, 1965. Цитируется в работе [138].

167. Бродер Д. Л., Зайцев Л. Н., Сычев Б. С., Туголуков А. М.//Атомная энергия. 1964. Т. 16. Вып. 1. С. 26.

168. Инженерный расчет защиты атомных электростанций/А. П. Веселкин, Ю. А. Егоров, Л. М. Лузанова и др./Под ред. А. П. Веселкина, Ю. А. Егорова. М.: Атомиздат, 1976.

169. Васильев Г. А., Веселкин А. П., Егоров Ю. А. и др.//Атомная энергия. 1965. Т. 18. Вып. 2. С. 121.

170. Сеницын Б. И., Цыпин С. Г.//Атомная энергия. 1962. Т. 12. Вып. 4. С. 306.

171. Кимель Л. Р., Машкович В. П. Защита от ионизирующих излучений. Справочник. М.: Атомиздат, 1966.

172. Аваев В. Н., Васильев Г. А., Веселкин А. П. др.//Атомная энергия. 1963. Т. 15. Вып. 1. С. 17.

173. Дулин В. А., Казанский Ю. А., Машкович В. П. и др.//Атомная энергия. 1960. Т. 9. Вып. 4. С. 315.

174. Даруга В. К., Лазуткин И. И., Николаев А. Н. и др.//Атомная энергия. 1964. Т. 17. Вып. 1. С. 60.

175. Березин В. С., Грушев Л. В., Дикарев В. С. и др.//Атомная энергия. 1957. Т. 2. Вып. 2. С. 118.

176. Машкович В. П., Сахаров В. К., Цыпин С. Г. См. [87], с. 182.

177. Аваев В. Н., Егоров Ю. А., Моисеев Г. Г.//Атомная энергия. 1964. Т. 16. Вып. 4. С. 355.

178. Машкович В. П., Николаев А. Н., Сеницын Б. И., Цыпин С. Г.//Атомная энергия. 1964. Т. 17. Вып. 1. С. 65.

179. Wood D. E.//Nucl. Sci. Engng. 1959. V. 5. N 1. P. 45.

180. Даруга В. К., Лазуткин И. И., Николаев А. Н. и др.//Атомная энергия. 1964. Т. 17. Вып. 1. С. 63.

181. Даруга В. К., Николаев А. Н., Пинхасик Д. С. и др.//Атомная энергия. 1964. Т. 17. Вып. 2. С. 145.

182. Physics of Fast and Intermediate Reactors. Vienna, IAEA, 1962. P. 403.

183. Белов С. П., Дулин В. А., Казанский Ю. А., Цыпин С. Г.//Атомная энергия. 1965. Т. 18. Вып. 1. С. 67.

184. Caswell R. S., Gabbard R. F., Doering W. P. e. a.//Phys. Rev. 1954. V. 94. N 3. P. 786.

185. Caswell R. S., Gabbard R. F., Padgett D. W. e. a.//Nucl. Sci. Engng. 1957. V. 2. N 2. P. 143.

186. Duggal V. P., Puri S. M., Sri Ram K.//Nucl. Sci. Engng. 1959. V. 5. N 3. P. 200.

187. Даггал В., Пури С., Рам К. Распределение быстрых нейтронов в воде и возраст нейтронов в водно-алюминиевой смеси. Доклад № 1640, представленный на Вторую международную конференцию по мирному использованию атомной энергии. Женева, 1958.

188. Дулин В. А., Казанский Ю. А., Шугар И. В.//Атомная энергия. 1963. Т. 14. Вып. 4. С. 404.

189. Крамер-Агеев Е. А., Машкович В. П.//Атомная энергия. 1963. Т. 15. Вып. 2. С. 160.

190. Крамер-Агеев Е. А., Машкович В. П.//Вопросы дозиметрии и защиты от излучений. Вып. 2. Под ред. В. И. Иванова. М.: Госатомиздат, 1963. С. 91.

191. Аваев В. Н., Васильев Г. А., Веселкин А. П. и др. См. [87], с. 193.

192. Allen F. J., Futterer A. T.//Nucleonics. 1963. V. 21. N 8. P. 120.

193. Clark F. H., Betz N. A., Brown J. Monte-Carlo Calculations of the Penetration of Normally Incident Neutron Beam Through Concrete. US AES, Report ORNL-3926, 1967.
194. Бродер Д. Л., Кутузов А. А., Левин В. В., Фролов В. В. См [87], С. 52.
195. Duggal V. P., Puri S. M. // J. Appl. Phys. 1958. V. 29. N 11. P 675.
196. Бродер Д. Л., Кутузов А. А., Левин В. В. и др. // Атомная энергия. 1959. Т. 7. Вып. 4. С. 313.
197. Бродер Д. Л. // Атомная энергия. 1957. Т. 3. Вып. 2. С. 55.
198. Белов С. П., Дулин В. А., Казанский Ю. А. и др. // Атомная энергия. 1959. Т. 6. Вып. 6. С. 663.
199. Бродер Д. Л., Кутузов А. А., Кондрашов А. П. // Атомная энергия. 1959. Т. 6. Вып. 5. С. 578.
200. Кеирим-Маркус И. Б., Корнеев В. Т., Маркелов В. В., Успенский Л. Н. // Атомная энергия. 1963. Т. 15. Вып. 5. С. 386.
201. Кеирим-Маркус И. Б., Успенский Л. Н. // Приборы и техника эксперимента. 1966. Т. 6. С. 96.
202. Веселкин А. П., Глущенко А. И., Егоров Ю. А., Орлов Ю. В. См. [160], С. 50.
203. Хольте. См. [90], С. 117.
204. Кухтевич В. И., Синицын Б. И. // Атомная энергия. 1961. Т. 10. Вып. 5. С. 511.
205. Липунов А. Д., Машкович В. П., Николаев А. Н. и др. // Атомная энергия. 1967. Т. 23. Вып. 6. С. 549.
206. Болятко В. В., Липунов А. Д., Машкович В. П. и др. // Атомная энергия. 1969. Т. 26. Вып. 3. С. 293.
207. Болятко В. В., Липунов А. Д., Машкович В. П. и др. // Вопросы дозиметрии и защиты от излучений. Вып. 8/Под ред. Л. Р. Кимеля. М.: Атомиздат, 1968. С. 88.
208. Болятко В. В., Липунов А. Д., Машкович В. П. и др. // Вопросы дозиметрии и защиты от излучений. Вып. 10/Под ред. Л. Р. Кимеля. М.: Атомиздат, 1969. С. 121.
209. Болятко В. В., Липунов А. Д., Машкович В. П. и др. // Вопросы физики защиты реакторов. Вып. 3/Под ред. Д. Л. Бродера и др. М.: Атомиздат, 1969. С. 138.
210. Adamson J., Judd A. M., McNair N. I. // J. Brit. Nucl. Soc. 1965. V. 4. N 2. P. 119.
211. Мирошников Г. В. // Атомная энергия. 1965. Т. 18. Вып. 5. С. 529.
212. Чэппен, Сторс. См. [90] с. 128
213. Бродер Д. Л., Попков К. К., Рубанов С. М. Биологическая защита судовых реакторов. Л.: Изд-во «Судоостроение», 1964.
214. Орлов В. В., Суворов А. П. См. [96], с. 22.
215. Methods and Experimental Coefficient Used in the Computation of Reactor Shielding. Доклад № 1190, представленный на Вторую международную конференцию по мирному использованию атомной энергии. Женева, 1958. (Auth.: Bourgeois J., Lafare P., Millot J. e. a.)
216. Кимель Л. Р., Машкович В. П. См. [92], с. 25.
217. Лазуткин И. И., Николаев А. Н., Синицын Б. И. // Бюллетень информационного центра по ядерным данным. Вып. 2/Под ред. А. И. Лейпунского и др. М.: Атомиздат, 1965. С. 313.
218. Кухтевич В. И., Синицын Б. И., Цыпин С. Г. // Атомная энергия. 1958. Т. 5. Вып. 5. С. 565.
219. Кухтевич В. И., Синицын Б. И., Дегтярев С. Ф. // Нейтронная физика/Под ред. П. А. Крупничского. М.: Госатомиздат, 1961. С. 278.
220. Reactor Handbook. Second Ed. v. I. Materials. N. Y. — London, 1962.
221. Васильев Г. А., Егоров Ю. А., Орлов Ю. В., Панкратьев Ю. В. См. [96], с. 17.
222. Крамер-Агеев Е. А., Машкович В. П. См. [71], с. 57.
223. Крамер-Агеев Е. А., Машкович В. П., Сахаров В. К. // Вопросы доз-

- метрии и защиты от излучений. Вып. 4/Под ред. Л. Р. Кимеля. М.: Атомиздат, 1965. С. 7.
224. Машкович В. П., Сахаров В. К. // Вопросы дозиметрии и защиты от излучений. Вып. 5/Под ред. Л. Р. Кимеля. М.: Атомиздат, 1966. С. 132.
225. Веселкин А. П., Нетеча М. Е., Никитин А. В. См. [119], с. 141.
226. Лейпунский О. И., Цыпин С. Г., Абагян А. А. и др. // Proceedings of the Third International Conference on the Peaceful Uses of Atomic Energy, Geneva, 31 August-9 September 1964. V. 4. Reactor Control. Многоязычное издание UN. N. Y. 1965. P. 372.
227. Веселкин А. П., Егоров Ю. А., Нетеча М. Е. и др. // Атомная энергия. 1969. Т. 26. Вып. 3. С. 269.
228. Веселкин А. П., Егоров Ю. А., Нетеча М. Е. и др. // Проблемы защиты от проникающих излучений реакторных установок. Т. 3. Мелекес, СЭВ, 1969. С. 71.
229. Дубровский Б. В., Кулаковский М. Я., Лавданский П. А. и др. // Атомная энергия. 1967. Т. 22. Вып. 2. С. 119.
230. Брискман Б. А., Генералова В. В., Крамер-Агеев Е. А., Трошин В. С. Внутрореакторная дозиметрия. Практическое руководство. М.: Энергоатомиздат, 1985.
231. Крамер-Агеев Е. А., Трошин В. С., Тихонов В. Г. Активационные методы спектрометрии нейтронов. М.: Атомиздат, 1976.
232. Машкович В. П. // Атомная энергия. 1990. Т. 68. Вып. 6. С. 427—431.
233. Кремнев В. А., Елин В. А., Гаврилов С. Д. // Атомная энергия. 1990. Т. 68. Вып. 5. С. 371—373.
234. Лавданский П. А., Назаров В. М., Стефанов Н. И., Фронтасьева М. В. // Атомная энергия. 1988. Т. 64. Вып. 64. С. 419—422.
235. Енговатов И. А., Лавданский П. А., Стефанов Н. И. // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Проектирование и строительство. М.: 1986. Вып. 3. С. 3—8.
236. Бабошин Н. Г., Енговатов И. А., Лавданский П. А., Стефанов Н. И. // Вопросы атомной науки и техники. Сер. проектирование и строительство. М.: 1988. Вып. 2. С. 105—108.
237. Decommissioning. Plenary session 2.1 // Proceedings 7th International Conference on Radiation Shielding. V. I. Bournemouth. UK. 12—16 September 1988. P. 59—144.
238. Decommissioning of the LOVISA Power Plant. Report YJT-87-20. Nuclear Waste Commission of Finish Power Companies. December 1987.
239. Майер Э. // Атомная энергия. 1989. Т. 67. Вып. 2. С. 83—88.
240. Evans J. C., Lepel E. A., Sanders R. W. e. a. // Radioactive Waste Management and the Nuclear Fuel Cycle. 1988. V. 11(1). P. 1—39.
241. May S., Piccot D., Bergemann L. e. a. // Decommissioning of nuclear power plants. Proceedings of a European Conference held in Luxemburg, 22—24 May, 1984. P. 47—60.
242. Matsui H., Ikezawa Y., Nakamura C. e. a. // Radiation Protection in Nuclear Energy. Proceedings of an International Conference on Radiation Protection in Nuclear Energy. V. II. IAEA, Vienna 1988. P. 31—39.
243. Neider R., Götz R., Müller M. K. e. a. See [242], с. 285—294.
244. Атлас спектров гамма-лучей радиационного захвата тепловых нейтронов/Л. В. Грошев, А. М. Демидов, В. Н. Луценко, В. И. Пелехов, М.: Атомиздат, 1958.
245. Bartholomew G. A., Higgs L. A. Compilation of Thermal Neutron Capture Gamma-Rays. Report AECL-669, 1958.
246. Bartholomew G. A., Doveika A., Eastwood K. M. e. a. // Nuclear Data Sect. A. 1967. V. 3. N 4—6. P. 367.
247. Groshev L. V., Demidov A. M., Pelekhov V. I. e. a. // Nucl. Data Tables. 1968. V. A5. N 1—2. P. 1.
248. Groshev L. V., Demidov A. M., Pelekhov V. I. e. a. // Nucl. Data Tables. 1969. V. A5. N 3—4. P. 243.
249. Bird J. B., Allen B. J., Biggerstaff I. e. a. // Nuclear Data Tables, 1973. V. 11. N 6. P. 433.
250. Bartholomew G. A. // Nuclear Data in Science and Technology. Proc. of the Symposium. Paris, 1973. Vienna, IAEA, 1973. V. 2. P. 343.

251. Maerker R. E., Muckenthaler F. J. Gamma-ray Spectra Arising from Thermal-Neutron-Capture in Elements Found in Soils, Concretes and Structural Materials, Report PRNL-4382, 1969.
252. Rasmussen N. C., Hukai Y., Inouye T. e. a. Thermal-Neutron-Capture Gamma-Ray Spectra of the Elements. Report MITNE 85/AFCRL-69—0071, 1969.
253. Rasmussen N. C., Orphan V. J., Harper J. L. e. a.//Line and Continuum Gamma-Ray Yields from Thermal-Neutron-Capture in the 75 Elements. Report DASA 2570 GA—10248, July 31, 1970.
254. White J. E., Fu C. Y., Yost K. J.//Nucl. Sci. Engng., 1973. V. 51. N 4. P. 496.
255. Yost K. J., White J. E., Fe C. Y., Ford W. E.//Nucl. Sci. Engng. 1972. V. 47. N 2. P. 209.
256. Booth R. S., White J. E., Penny S. K. e. a.//Nucl. Sci. Engng. 1972. V. 47. N 1. P. 8.
257. Maerker R. E., Muckenthaler F. J.//Nucl. Sci. Engng. 1979. V. 42. N 3. P. 335.
258. Прайс Б., Хортон К., Спинни К. Защита от ядерных излучений: Пер. с англ./Под ред. С. Г. Цыпина. М.: Изд-во иностр. лит., 1959.
259. Болятко В. В., Кулаковский М. Я., Машкович В. П. и др. Исследование распространения нейтронов промежуточных энергий и захватного γ -излучения в защите реакторов на быстрых нейтронах. Доклад на IV международной конференции по защите реакторов. Париж, 1972.
260. Абагян А. А., Вражнов Ю. Н., Гермогенова Т. А. и др. Характеристики вторичного γ -излучения, выходящего из тяжелого компонента защиты атомных реакторов. Доклад на IV международной конференции по защите реакторов. Париж, 1972.
261. Городинский С. М. Средства индивидуальной защиты для работы с радиоактивными веществами. Изд. 3-е, перераб. и доп. М.: Атомиздат, 1979.
262. Пучеров Н. Н., Борздаковский А. Е., Романовский С. В., Чеснокова Т. Д. Таблицы пробегов заряженных частиц с энергией до 8 МэВ. Киев: Наукова думка, 1977.
263. Пучеров Н. Н., Романовский С. В., Чеснокова Т. Д. Таблицы массовой тормозной способности и пробегов заряженных частиц с энергией 1—100 МэВ. Киев: Наукова думка, 1975.
264. Studies in Penetration of Charged Particles in Matter. Nuclear Science Series, Report Number 39, Washington, D. C., 1964. P. 111.
265. Человек. Медико-биологические данные. Публикация № 22 МКРЗ: Пер. с англ./Под ред. Ю. Д. Парфенова. М.: Медицина, 1977.
266. Мухин К. Н. Экспериментальная ядерная физика. Том 1. Физика атомного ядра. 3-е изд., перераб. и доп. Учебник для вузов. М.: Атомиздат, 1974.
267. Баранов В. Ф. Дозиметрия электронного излучения. М.: Атомиздат, 1974.
268. Немец О. Ф., Гофман Ю. В. Справочник по ядерной физике. КИЕВ: Наукова думка, 1975.
269. Tabata T., Ito R.//Nucl. Sci. Engng. 1974. V. 53. P. 226.
270. Тормозная способность электронов и позитронов. Доклад 37 МКРЕ: Пер. с англ./Под ред. И. Б. Кеирим-Маркуса. М.: Энергоатомиздат, 1987.
271. Radiation Protection Design Guidelines for 0,1—100 MeV Particle Accelerator Facilities. NCRP. Report N 51. Washington, 1977.
272. Машкович В. П. См. [190]. С. 109.
273. Климанов В. А., Коновалов В. А., Кочанов В. А. и др. Распространение ионизирующих излучений в воздухе/Под ред. В. И. Кухтевича, В. П. Машковича. М.: Атомиздат, 1979.
274. Булатов Б. П., Ефименко Б. А., Золотухин В. Г. и др. Альbedo гамма-излучения. М.: Атомиздат, 1968.
275. Гермогенова Т. А., Золотухин В. Г., Климанов В. А. и др. Альbedo нейтронов. М.: Атомиздат, 1973.
276. Зольников П. П. Диссертация. Свердловск, УПИ, 1970.
277. Ефименко Б. А., Золотухин В. Г., Климанов В. А. и др.//Вопросы до-
зиметрии и защиты от излучений. Вып. 13. Под. ред. Л. Р. Кимеля. М.: Атомиздат, 1973. С. 15.
278. Панченко А. М., Панин М. П., Барашев А. В.//Атомная энергия. 1990. Т. 68. Вып. 2. С. 111—116.
279. Shoemaker N., Huddleston C. M.//Nucl. Sci. Engng. 1964. V. 18. N 1. P. 113.
280. Berger M. J., Raso D. J.//Rad. Res. 1960. V. 12. N 1. P. 20.
281. Зольников П. П., Двинянинов Б. Л., Суханова К. А.//Атомная энергия. 1969. Т. 27. Вып. 6. С. 542.
282. Булатов Б. П., Гарусов Е. А.//Атомная энергия. 1958. Т. 5. Вып. 6. С. 631.
283. Викторов А. А., Ефименко Б. А., Золотухин В. Г. и др.//Атомная энергия. 1967. Т. 23. Вып. 3. С. 187.
284. Leimdörfer M.//Nucl. Sci. Engng. 1963. V. 17, N 3. P. 352.
285. Викторов А. А., Машкович В. П.//Атомная энергия. 1968. Т. 24. Вып. 3. С. 276.
286. Chandrasekhar S. Radioactive Transfer. Oxford, Clarendon Press, 1950.
287. Spencer L. V. Neutron Penetration in Cylindrical ducts. NBS-8542. 1964.
288. Maerker R. E., Muckenthaler F. J.//Nucl. Sci. Engng. 1966. V. 26. N 3. P. 339.
289. Климанов В. А., Махоньков А. С., Машкович В. П.//Атомная энергия. 1976. Т. 41. Вып. 3. С. 214.
290. Климанов В. А., Махоньков А. С., Машкович В. П.//Атомная энергия. 1978. Т. 45. Вып. 4. С. 286.
291. French R. L., Wells M. B.//Nucl. Sci. Engng. 1964. V. 19. N 4. P. 441.
292. Dosimetry and Strahlenschutz. Heraus gegeben von R. G. Jaeger, W. Hübner. 2 Auflage. GTV, Verlag Stuttgart, 1974.
293. Лагутина И. С., Машкович В. П., Строганов А. А., Черняев А. М.//Атомная энергия. 1989. Т. 66. Вып. 2. С. 103—106.
294. Лагутина И. С., Машкович В. П., Строганов А. А., Черняев А. М.//Тезисы докладов Пятой всесоюзной научной конференции по защите от ионизирующих излучений ядерно-технических установок. 19—21 сентября 1989 г. Протвино, С. 127—128.
295. Кимель Л. Р., Расцветалов Я. Н., Сидорин В. П. и др. Расчет методом Монте-Карло спектральных распределений рассеянного нейтронного излучения от высокоэнергетических ускорителей. Дубна: ОИЯИ, P16—6182, 1971.
296. Nakamura T., Kosako T.//Nucl. Sci. Engng. 1981. V. 77. N 2. P. 168—181.
297. Wells M., Andrews M., French R. See [33], P. 1007—1016.
298. Nakamura T., Hayashi K. Ibid. P. 1017—1025.
299. Hayashi K., Nakamura T.//Nucl. Sci. Engng. 1984. V. 87, N 2. P. 123—135.
300. Nakamura T., Uwamino Y., Hayashi K. e. a. Ibid. 1985. V. 90. N 3. P. 281—297.
301. Hayashi K., Nakamura T. Ibid. 1985. V. 91. N 3. P. 332—348.
302. Nason R., Shultis J., Faw R. e. a. Ibid. 1981. V. 79. N 4. P. 404—416.
303. Roseberry M., Shultis J. Ibid. 1982. V. 80. N 2. P. 334—338.
304. Советский энциклопедический словарь. Изд. 3-е. М.: Советская энциклопедия, 1984. С. 986.
305. Взаимодействие ионизирующего излучения с веществом. Химический состав тканезквивалентного вещества. ГОСТ 18622—79. М.: Изд-во стандартов, 1980.
306. Таблицы e^x и e^{-x} . Математические таблицы. М.: Изд-во АН СССР, 1955.
307. Таблицы интегральной показательной функции. Математические таблицы. М.: Изд-во АН СССР, 1954.

ПРЕДМЕТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ

Указатель отражает весь текст справочника, включая приложения. Ссылки к тексту даны на страницы справочника, где приводятся те или иные термины, раскрываются существенные стороны их смысла, приводятся табличные и графические данные о величинах и зависимостях. Алфавитное расположение материала в указателе — слово за словом.

- Активность радионуклида 13
данной массы 16
линейная 14
наведенная 396—400
объемная 14
поверхностная 14
удельная 14
- Альbedo потоковое 432, 435
связь с токовым 435
- Альbedo токовое 432—435
дважды дифференциальное спектральное 433
дифференциальное 434
интегральное 434
- нейтронов 460
— медленных, промежуточных, быстрых 458—460
— тепловых 458
- фотонов 436—454
— групповое представление дифференциального спектрального альbedo 444—448
— дифференциальные характеристики для ^{137}Cs и ^{60}Co 437—440
— зависимость от кривизны 454
— толщины 454
— интегральные характеристики 448—454
— метод экономии исследований 443, 444
— улучшенная полупирическая формула 436, 441—448
— факторы накопления энергии при отражении 435, 453
- электронов 461—462
- Барн 125
Беккерель 14
Бэр 29
- Величина:
дозиметрическая 21
— базисная 21
— фантомная 22
нестохастическая 23
стохастическая 23
физическая 13
- Выходы захватного γ -излучения групповые:
при захвате нейтронов разных энергий 407—413
— — — тепловых 401—406
- Гамма-излучение 7
Гамма-метод 145
Гамма-постоянная радионуклида 41
дифференциальная 41
нормализованная 42, 43
полная 41
по мощности кермы в воздухе 42, 48—78
— — эквивалентной
- — — дозы 42—44, 48—78
— — — максимальной 45, 48—78
после начальных фильтров 79—81
табличные значения 48—78
учет дочерних продуктов 46—48
- Гамма-эквивалент 82
по мощности различных дозиметрических величин 83
- Геометрия пучка 126
ГОСТ 8.417-81 9
- Группы критических органов 113
Грей 22
- Дифференциальное сечение комптоновского рассеяния:
для числа фотонов 182—184
для энергии фотонов 185—187
- Длина релаксации 126
моноэнергетических нейтронов 359, 360
нейтронов деления 352—358
нейтронов промежуточных энергий 361, 362
нейтронов (α , n)-источников 359, 360
- Длина свободного пробега 150
- Доза ионизирующего излучения:
амбиентная эквивалентная 30, 31
индивидуальная 37
коллективная 37
поглощенная 22, 23
— для единичного флюенса 33
максимальная 23
эквивалентная 29
— для единичного флюенса 33
максимальная 30, 33
экспозиционная 25, 26
эффективная эквивалентная 36, 37
- Допустимая концентрация в воде и воздухе отдельных радионуклидов 115—117
смеси радионуклидов известного состава 122—124
— — неизвестного или частично неизвестного состава 123, 124
- Допустимая плотность потока частиц 120, 121
- Допустимое загрязнение поверхностей 121
- Единицы физических величин 13
внесистемные 10
образование кратных и дольных единиц 12
СИ 8
- Закон радиоактивного распада 15
- Защита:
от излучений электронных ускорителей 429—431
от рентгеновского излучения 286—290
от тормозного излучения радионуклидов 428, 429
- Защиты:
геометрия 107
классификация 107

- компоновка 107
назначение 107
типы 107
- Значение физической величины 13
Зиверт 29
- Излучение ионизирующее 7
анигиляционное 46, 147—148
бета 7
вторичное 8
вторичное в защите 400—415
корпускулярное 8
косвенно ионизирующее 7
моноэнергетическое 8
направленное 8
немоноэнергетическое 8
непосредственно 7
первичное 8
рентгеновское 7
смешанное 8
тормозное 7
фотонное 7
характеристическое 7
- Изотоп 8
- Интеграл:
активационный 396
резонансный 307—334
- Источник ионизирующего излучения 8
классификация 39—41
нейтронов 94—102
— деления запаздывающих 101
— деления мгновенных 99
— на основе ускорителей заряженных частиц 98, 99
— по реакции (α , n) 94, 95
по реакциям (p , n), (d , n) 98
радионуклидный 8
спонтанного деления 97
фотонейтронный 95—97
ядерного и термоядерного взрывов 102
- Категории облучаемых лиц 112, 113
- Квазиальbedo 434
Квазискайшайн 462
- Керма 24, 25
для единичного флюенса 33, 34
Керма-постоянная 42
- Керма-эквивалент радионуклидного источника 81—83
- Коэффициент:
взаимодействия фотонов 146—150
запаса при проектировании защиты 118
изотропности 119—122
качества излучения 27—29
накопления подпороговых нейтронов 391—394
ослабления фотонов 149—150
— — массовый и линейный для разных сред 152—164
передачи энергии фотонов 149—150
поглощения β -частиц 419
поглощения энергии фотонов 149, 150
— — — массовый и линейный для разных сред 165—174
- Кратность ослабления 126
- Критический орган 113
- Кулон на килограмм 26
- Кюри 14
- Линейная передача энергии 27, 28
Лучевая отдача рентгеновских трубок 286

- Масса радионуклида 16
- Международная система единиц (СИ) 8
основные, дополнительные единицы 9
- Метод:
длин релаксации 350
конкурирующих линий 285, 286
расчета защиты от γ -излучения объемных источников 291—305
расчета защиты по слоям ослабления фотонов 276—283
плоского изотропного источника 278, 279
точечного изотропного источника 279—283
эквивалентной толщины ослабления 146
- Миллиграмм-эквивалент радия 82
- Минимально значимая активность на рабочем месте 116—117, 122
- Мощность дозы:
поглощенной 39
при проектировании защиты 114
эквивалентной 39
экспозиционной 39
эффективной эквивалентной 39
- Мощность кермы 39
- Нейтроны разных энергий 387—389
- Номограммы расчета водной защиты от нейтронов (α , n)-источников 394—396
- Нормирование при комбинированном воздействии смешанного излучения 122—124
- Нормы радиационной безопасности 112
- Нуклид 8
- Облучение 110
- Ограниченная часть населения 112
- Относительная биологическая эффективность излучения 27
- Периоды полураспада радионуклидов 14
- Персонал 112
- Плотность:
веществ 467—469
газов 468
жидкостей 469
- Плотность потока частиц 21
— — энергии частиц 21
- Плотность скалярного тока частиц 18, 19
- Плотность тока частиц 17—19
— — энергии частиц 17
- Показатель эквивалентной дозы 30
- Поле излучения ионизирующего 8
- Поля излучений точечных и протяженных источников:
без учета рассеянного излучения 126—141
с учетом рассеянного в защите излучения 145—146
с учетом рассеянного в источнике излучения 144—145
- Поправка на барьерность 249—253
- Потери энергии электронов 421—428
- Поток:
частиц 21
энергии частиц 21
- Предел дозы 113
- Пределы основные дозовые 113
- Предельно допустимая доза 113
- Преобразование для расчетов полей излучений 142—144
в классе изотропных источников 143

обратные 142
прямые 142
Пробег в веществе:
α -частиц 415—418
β -частиц 418
электронов 418
— максимальный 418, 428
— средний 418, 421—427
— экстраполированный 418, 419, 421—427
Рад 24
Радиовый гамма-эквивалент 82
Радиоактивность 8
Радионуклид 8
Размерность физической величины 13
Распределение нейтронов в средах пространственно-энергетическое 342—347
Рентген 26
Риск 35—37
Сечения взаимодействия:
нейтронов:
активации 307—334
полные 338—341
при радиационном захвате тепловых нейтронов 306—334
при рассеянии тепловых нейтронов 306
фотонов:
при когерентном рассеянии 175—180
при некогерентном рассеянии 175—180
при образовании пар 175—180
при фотоэлектрическом поглощении 175—180
частиц:
макроскопические 125, 126
микроскопические 125
парциальные 125
полные 125
Сечения выведения:
для гетерогенных сред 377—385
для гомогенных сред 385—386
использование для расчетов неводородсодержащих защит 386
коллимированные 384—385
определение 376
Сечения пороговых реакций 375
Скайшайн излучений 462—466
Слой ослабления 276—284
десятичного 276, 278—283
половинного 276, 279—283
Смеси продуктов деления ^{235}U и ^{238}U 102—107
Соотношения между единицами СИ и внесистемными 10—12
Состав нейтронов дозовый в средах 387—391
Стандарт СТ СЭВ 1052-78 9
Стоимость защиты 4
Схема распада 15
Таблицы:
интегрального секанса 477—478
универсальные для расчета защиты от фотонного излучения 262—276
функцией e^{-x} , E_n 471—476
Типы распада 14—15
Ток скалярный 17—18
Тормозное излучение радионуклидов: выход 90, 91

энергетическое распределение 91
Угловое распределение излучения источника 40
изотропное 40
комбинация изотропного и косинусоидального 40
косинусоидальное $\sim \cos\theta_0$ 40
косинусоидальное $\sim \cos^2\theta_0$ 40
монопроводное 40
Угловое распределение рассеянного излучения за барьерами:
для источников нейтронов 347—350
для источников фотонов 191—195
Уровни допустимые 115
Фактор Весткотта 334
Факторы накопления фотонов 196—197
в барьерной геометрии 248—255
для бесконечных гомогенных сред:
для плоского изотропного источника 220—223
для плоского косинусоидального источника 229—230
для плоского монопроводного источника 224—228
для точечного изотропного источника 198—219
для гетерогенных сред 258—262
для ограниченных сред 256—257
коэффициенты представления Бергера 209, 238—246
коэффициенты экспоненциального представления 209, 231—237
определения 196—197
поправочные коэффициенты на барьерность 249—250, 252—253
формы представления 209, 218—219, 237
Флюенс:
частиц 21
энергии частиц 21
Фон:
естественный 110—112
искусственный 110—112
техногенный 110—112
Характеристики поля излучения 16—21
дифференциальные 16—20
интегральные 19—21
Характеристический угол 192—195, 347—350
Цепочки радиоактивного распада 91—94
Частица ионизирующая 7
Человеко-бэр 37
Человеко-зиверт 37
Число нейтронов на акт деления 102
Числовое значение физической величины 13
Электрон-вольт 10—11
Энергетические эквиваленты:
кулона на килограмм 26, 27
рентгена 27
Энергетический состав:
β -излучения радионуклидов 83—88
γ -излучения радионуклидов 48—78
Энергия:
фотона после комптоновского рассеяния 174, 181, 188—190
эффективная для тормозного излучения 428—429

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	3
Глава 1. Физические величины и их единицы в области радиационной безопасности	7
§ 1.1. Основные понятия	7
§ 1.2. Международная система единиц (СИ)	8
§ 1.3. Активность радионуклида	13
§ 1.4. Характеристики поля излучения	16
§ 1.5. Дозиметрические характеристики поля излучения	21
Глава 2. Основные характеристики источников излучения и защит	39
§ 2.1. Классификация источников излучения	39
§ 2.2. Радиоактивные нуклиды как γ -излучатели	41
§ 2.3. Керма-эквивалент радионуклидного источника	81
§ 2.4. Радиоактивные нуклиды как β -излучатели	83
§ 2.5. Тормозное излучение радионуклидов	89
§ 2.6. Цепочки радиоактивного распада	91
§ 2.7. Характеристики источников нейтронов	94
§ 2.8. Продукты деления ^{235}U и ^{238}U как источники γ -излучения	102
§ 2.9. Классификация защит	107
Глава 3. Предельно допустимые уровни ионизирующих излучений	109
§ 3.1. Принципы нормирования радиационного облучения	109
§ 3.2. Фоновое облучение человека	110
§ 3.3. Категории облучаемых лиц и группы критических органов	112
§ 3.4. Дозовые пределы облучения и допустимые уровни	113
§ 3.5. Нормирование при комбинированном воздействии смешанного излучения	122
Глава 4. Поля излучений точечных и протяженных источников за защитой и без защиты	125
§ 4.1. Законы ослабления излучений в веществе	125
§ 4.2. Поля излучений точечных и протяженных источников без учета рассеянного излучения	126
§ 4.3. Преобразования для расчетов полей излучений	142
§ 4.4. Методы учета рассеянного в источнике и защите излучения	144
Глава 5. Защита от фотонного излучения	146
§ 5.1. Сечения взаимодействия фотонного излучения с веществом	146
§ 5.2. Угловые распределения рассеянного фотонного излучения за защитными барьерами	191
§ 5.3. Факторы накопления гомогенных сред	196
§ 5.4. Факторы накопления гетерогенных сред	258
§ 5.5. Универсальные таблицы для расчетов защиты от фотонного излучения точечных изотропных источников	262
§ 5.6. Защита от плоских и точечных изотропных источников по слоям ослабления	276
§ 5.7. Метод конкурирующих линий для расчета защиты от немонотонных энергетических источников	285
§ 5.8. Защита от рентгеновского излучения	286
§ 5.9. Графический метод расчета защиты от γ -излучения объемных источников	291
Глава 6. Защита от нейтронов	305
§ 6.1. Сечения взаимодействия нейтронов с веществом	305
§ 6.2. Пространственно-энергетические распределения нейтронов в различных средах	342

§ 6.3. Угловые распределения рассеянных нейтронов за барьерами . . .	347
§ 6.4. Метод длин релаксации для расчетов пространственных распределений нейтронов	350
§ 6.5. Сечения выведения	376
§ 6.6. Дозовый состав нейтронного излучения в защитах	387
§ 6.7. Коэффициенты накопления подпороговых нейтронов	391
§ 6.8. Номограммы для расчета водной защиты от нейтронов (α, n)-источников	394
§ 6.9. Активация материалов в поле нейтронов	396
§ 6.10. Вторичное γ -излучение в защитах	400
Глава 7. Защита от α- и β-излучений	415
§ 7.1. Пробеги α -частиц в веществе	415
§ 7.2. Защита от электронного излучения	418
Глава 8. Альbedo излучений	432
§ 8.1. Основные понятия и определения	432
§ 8.2. Альbedo фотонного излучения	436
§ 8.3. Альbedo нейтронов	458
§ 8.4. Альbedo электронов	461
§ 8.5. Скайшайн и квазискайшайн излучений	462
Приложения	467
Физические постоянные	467
Плотность веществ ρ	467
Таблицы функций	470
Список литературы	479
Предметный указатель	490

Справочное издание

Машкович Вадим Павлович
Кудрявцева Анна Вадимовна

ЗАЩИТА ОТ ИОНИЗИРУЮЩИХ ИЗЛУЧЕНИЙ

Зав. редакцией *Е. А. Путилова*
Редактор *Т. А. Солдатенкова*
Художественный редактор *Б. Н. Тумин*
Технический редактор *Т. Ю. Андреева*
Корректор *З. Б. Драновская*
ИБ 3449

Сдано в набор 29.09.92. Подписано в печать 24.01.95.
Формат 60×88¹/₁₆ Бумага офсетная № 2. Гарнитура литературная.
Печать офсетная. Усл. печ. л. 30,38. Усл. кр.-отт. 30,69. Уч.-изд. л. 42,53.
Тираж 1500 экз. Заказ 760т. С 020

Энергоатомиздат. 113114 Москва, М-114, Шлюзовая наб., 10

Типография НИИ «Геодезия», г. Красноармейск

Список замеченных опечаток

Стр.	Строка	Напечатано	Читать
3	12 св.	28	29
3	13 св.	около 20 ГВт	21, 242 ГВт
19	Формула (1.21)		$J(r) = \int_{4\pi} J(r, \Omega) d\Omega =$ $= \int_{4\pi} \Omega \varphi(r, \Omega) d\Omega$
199	Табл. 5.13 1—2 св.	Слова «для воды» перенести со строки 1 на одну строку ниже	
388	Графы 4—11 5 сн.	относятся также к Ra— α —Be- и Pu— α —Be-источникам	
388	Графы 4—11 4 сн.	опустить на 2 строки	
412-413	Табл. 6.36 графа 10 1 сн.	Знак и цифры « { 5,3» поднять на 1 строку	

Машкович В. П., Кудрявцева А. В., — Справочник

**СООТНОШЕНИЯ МЕЖДУ ЕДИНИЦАМИ СИ И Внесистемными изымаемыми из обращения
ЕДИНИЦАМИ В ОБЛАСТИ РАДИАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ**

Величина и ее символ	Единица СИ		Внесистемная единица		Соотношения между единицами
	Наименование	Обозначение	Наименование	Обозначение	
Активность \mathcal{A}	беккерель	Бк	кюри	Ки	1 Ки = 3,700·10 ¹⁰ Бк
Поглощенная доза D , керма K	грей	Гр	рад	рад	1 рад = 1·10 ⁻² Гр
Эквивалентная доза H , эффективная эквивалентная доза H_E	зиверт	Зв	бэр	бэр	1 бэр = 1·10 ⁻² Зв
Экспозиционная доза X^*	кулон на килограмм	Кл/кг	рентген	Р	1 Р = 2,58·10 ⁻⁴ Кл/кг
Сечение взаимодействия σ	квадратный метр	м ²	барн	б	1 б = 1·10 ⁻²⁸ м ²
Поглощенная доза для единичного флюенса δ_D , керма для единичного флюенса δ_K	грей-метр в квадрате	Гр·м ²	рад-сантиметр в квадрате	рад·см ²	1 рад·см ² = 1·10 ⁻⁶ Гр·м ²
Эквивалентная доза для единичного флюенса δ_H	зиверт-метр в квадрате	Зв·м ²	бэр-сантиметр в квадрате	бэр·см ²	1 бэр·см ² = 1·10 ⁻⁶ Зв·м ²
Энергия	джоуль	Дж	электрон-вольт	эВ	1 эВ = 1,602·10 ⁻¹⁹ Дж

* Использование экспозиционной дозы и ее мощности после 1 января 1990 г. не рекомендуется.