Государственное санитарно-эпидемиологическое нормирование Российской Федерации

2.6.5. Атомная энергетика и промышленность

Дозиметрия
Определение индивидуальной эффективной дозы нейтронного излучения

Методические указания
МУ 2.6.5.052–2017

Издание официальное

Москва
2018

1. Разработаны:

Федеральным медицинским биофизическим центром им. А.И. Бурназяна ФМБА России (Цовьянов А.Г. – руководитель разработки, к.т.н. Кочетков О.А., д.т.н. Клочков В.Н.);

НПП «Доза» (к.т.н. Нурлыбаев К., Синников Л.Л.);

ФГУП «ВНИИФТРИ» (к.т.н. Масляев П.Ф.);

ФГБУ ГНЦ ИФВЭ (к.т.н. Алексеев А.Г.);

ММО ОИЯИ (к.т.н. Мокров Ю.В.).

2. Рекомендованы к утверждению Подкомиссией по государственному санитарно-эпидемиологическому нормированию ФМБА России (протокол от 11.10.2017 № 05/2017).

3. Утверждены заместителем руководителя Федерального медико-биологического агентства, Главным государственным санитарным врачом по обслуживаемым организациям и обслуживаемым территориям Романовым В.В. 11.10.2017 г.

4. Дата введения в действие – с момента утверждения.

5. Вводятся взамен МУ 2.6.1.45–01. Дозиметрия. Определение индивидуальных эффективных доз нейтронного излучения, утвержденных заместителем Главного государственного санитарного врача по специальным вопросам Шамовым О.И. и директором Департамента по безопасности и чрезвычайным ситуациям Агаповым А.М. 31.10.01.

Содержание

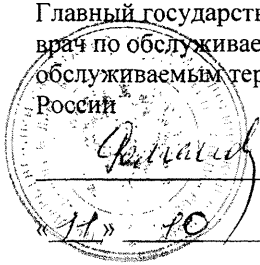
1. Область применения ... 7
2. Нормативные ссылки ... 7
3. Термины и определения ... 8
4. Общие положения ... 8
5. Дозиметрические величины ... 10
5.1. Физические величины ... 10
5.2. Нормируемые величины ... 11
5.3. Операционные величины ... 11
6. Содержание контроля облучения нейтронами ... 12
6.1. Виды ИДК облучения нейтронами ... 12
6.2. Критерии введения ИДК нейтронного излучения ... 13
6.3. Определение индивидуальной дозы облучения персонала нейтронами с помощью ИДК ... 13
6.4. Определение индивидуальной дозы облучения персонала нейтронами посредством ДКРМ ... 15
7. Требования к регистрации и хранению результатов индивидуального дозиметрического контроля ... 15
8. Классификация приборов контроля нейтронного излучения ... 16
9. Неопределенность результатов дозиметрического контроля нейтронов ... 17
10. Калибровка дозиметров нейтронов ... 18
10.1. Требования к калибровке дозиметров нейтронов ... 18
10.2. Калибровка в стандартных условиях калибровки ... 19
10.3. Поправки для конкретных полей нейтронов ... 21
10.4. Проверка стабильности поля нейтронов ... 21
Библиография ... 22
Приложение 1 (справочное). Методика проведения индивидуального дозиметрического контроля внешнего облучения персонала ... 24
Приложение 2 (справочное). Методика определения эффективной дозы нейтронного излучения путем измерения индивидуального эквивалента дозы термолюминесцентными дозиметрами ... 38
Приложение 3 (справочное). Требования к метрологическому, методическому и аппаратурному обеспечению дозиметрии нейтронов ... 61
Приложение 4 (информационное). Основные методы дозиметрии нейтронов ... 74
Приложение 5 (информационное). Дозиметрия импульсного нейтронного излучения электронными дозиметрами ... 78
Приложение 6 (справочное). Основные факторы, влияющие на результаты дозиметрии нейтронов ... 81
Приложение 7 (справочное). Переходные коэффициенты для операционных величин нейтронного излучения ... 102

Условные обозначения и сокращения

В настоящих Методических указаниях приняты следующие условные обозначения и сокращения:

ДКРМ	– дозиметрический контроль рабочих мест
ИДК	– индивидуальный дозиметрический контроль
ИИИ	– источник ионизирующего излучения
МАГАТЭ	– Международное агентство по атомной энергии
МЭК	– Международная электротехническая комиссия
ИСО	– Международная организация по стандартизации
МИ	– методика измерений
МКРЕ	– Международная комиссия по радиационным единицам и измерениям
МКРЗ	– Международная комиссия по радиологической защите
МУ	– Методические указания
ПММА	– полиметилметакрилат
ТЛД	– термолюминесцентный детектор или дозиметр

УТВЕРЖДАЮ
Заместитель руководителя Федерального медико-биологического агентства, Главный государственный санитарный врач по обслуживаемым организациям и обслуживаемым территориям ФМБА России



_____ В.В. Романов

«11» 10 _____ 2017 г.

Дата введения – с момента утверждения

2.6.5. Атомная энергетика и промышленность

Дозиметрия
Определение индивидуальной эффективной дозы нейтронного излучения

Методические указания

МУ 2.6.5.052 – 2017

1. Область применения

1.1. Настоящие Методические указания (далее – МУ) распространяются на методы, методики и порядок определения индивидуальной эффективной дозы профессионального облучения при работах с источниками нейтронного излучения.

1.2. В настоящих МУ установлены требования к проведению индивидуального дозиметрического контроля внешнего облучения персонала, подвергающегося воздействию источников нейтронного излучения.

1.3. Настоящие МУ предназначены для организаций Госкорпорации «Росатом», межрегиональных управлений и центров гигиены и эпидемиологии ФМБА России, а также для организаций, разрабатывающих приборное и методическое обеспечение радиационного контроля, и других организаций, использующих источники нейтронного излучения.

2. Нормативные ссылки

Настоящие МУ разработаны на основании и с учетом следующих нормативных документов:

2.1. СанПиН 2.6.1.2523-09. Нормы радиационной безопасности (НРБ-99/2009).

2.2. СП 2.6.1.2612-10. Основные санитарные правила обеспечения радиационной безопасности (ОСПОРБ 99/2010).

2.3. МИ 2453-2015 ГСИ. Методики радиационного контроля. Общие требования.

2.4. МУ 2.6.5.028-2016. Определение индивидуальных эффективных и эквивалентных доз и организация контроля профессионального облучения в условиях планируемого облучения. Общие требования.

2.5. МУ 2.6.5.026-2016. Дозиметрический контроль внешнего профессионального облучения. Общие требования.

2.6. Р 1.1.050-2016. Руководство. Порядок разработки, изложения, оформления и представления нормативных и методических документов системы государственного санитарно-эпидемиологического нормирования в подкомиссию по специальному нормированию ФМБА России.

3. Термины и определения

В настоящем документе использованы термины и определения, установленные Федеральными законами, НРБ-99/2009 и ОСПОРБ-99/2010, МУ 2.6.5.028-2016, а также следующие термины и определения:

3.1. ***Условия калибровки стандартные*** – условия, представляющие собой диапазон значений набора влияющих величин, в соответствии с которыми выполняется калибровка или определяется отклик.

3.2. ***Условия облучения стандартные*** – определенные для целей нормирования техногенного облучения условия воздействия техногенных источников ионизирующего излучения на человека, которые характеризуются следующими параметрами:

– степенью однородности потока излучения, падающего на тело, при которой отношение максимальной плотности потока излучения к средней не превышает 2,0.

4. Общие положения

4.1. Настоящие Методические указания (далее – МУ) предназначены для обеспечения единства и систематизации методических подходов к дозиметрическому контролю.

4.2. Настоящие МУ развивают и конкретизируют общие требования к организации и проведению индивидуального дозиметрического контроля, установленные в НРБ-99/2009, МУ 2.6.5.028-2016 к ИДК нейтронного излучения.

4.3. При разработке настоящих МУ использован накопленный опыт практического применения МУ 2.6.1.45-2001. «Дозиметрия. Определение индивидуальных эффективных доз нейтронного излучения», а также положения новых международных документов: Доклад 66 МКРЕ (2001 г.), Стандарт ИСО 21909 (2005 г.), Стандарт МЭК 61005 (2014 г.), Основные Нормы Безопасности МАГАТЭ (2014 г.).

4.4. Целью ИДК является получение информации о дозе облучения персонала для ее последующего сопоставления с основными пределами дозы и контрольными уровнями для оценки радиационной безопасности персонала.

4.5. В планируемых условиях облучения результатом контроля дозы профессионального облучения является консервативная оценка значений нормируемых величин облучения персонала, регламентированных в НРБ-99/2009.

4.6. Общие требования к организации и проведению дозиметрического контроля внешнего облучения персонала изложены в МУ 2.6.5.028-2016 и в МУ 2.6.5.026-2016.

4.7. МУ устанавливают правила организации и способы выполнения контроля индивидуальной эффективной дозы профессионального облучения нейтронным излучением.

4.8. В Приложении 1 изложен порядок разработки типовых МИ и МИ для конкретных предприятий.

В Приложении 2 представлена типовая методика определения эффективной дозы нейтронного излучения при измерении индивидуального эквивалента дозы термолюминесцентными дозиметрами.

В Приложении 3 представлены требования к метрологическому, методическому и аппаратурному обеспечению дозиметрии нейтронов.

В Приложении 4 описаны основные методы дозиметрии нейтронов.

В Приложении 5 изложены особенности дозиметрии импульсного нейтронного излучения электронными дозиметрами.

В Приложении 6 указаны основные факторы, влияющие на результаты дозиметрии нейтронов.

В Приложении 7 приведены переходные коэффициенты для операционных величин нейтронного излучения. В частности, в нем приведены переходные коэффициенты для амбиентного эквивалента дозы от флюенса нейтронов до энергии 200 МэВ.

4.9. Нейтронная дозиметрия существенно отличается от фотонной дозиметрии. Методы дозиметрии нейтронного излучения очень сильно зависят от характеристик полей нейтронного излучения. В частности, это связано с широким диапазоном энергии нейтронов (больше девяти порядков величины). В таком диапазоне энергии существенно изменяются физические процессы взаимодействия нейтронов с веществом. Операционные величины (амбиентный или индивидуальный эквивалент дозы), измеряемые при радиационном контроле, основаны на эквивалентах дозы и включают в себя взвешивающие коэффициенты, которые существенно меняются с энергией нейтронов.

4.10. С учетом указанной энергетической зависимости для нейтронных измерений чрезвычайно важным является отношение операционных величин к флюенсу нейтронов. Это отношение выражается переходными коэффициентами, которые значительно меняются с энергией нейтронов и требуют разных методов измерения для разных диапазонов энергии. Для применения этих коэффициентов необходимо знание энергетического спектра нейтронных полей на рабочих местах. В настоящих МУ обсуждена неопределенность, с которой могут быть определены операционные величины.

4.11. Энергетический спектр нейтронного излучения может меняться со временем. Нейтронные поля на рабочих местах в большей степени изотропны, чем поля фотонного излучения, т. к. нейтроны гораздо больше, чем фотоны, склонны к рассеиванию окружающими предметами (стенами, оборудованием, воздухом). В то же время нейтронные поля всегда сопровождаются фотонами, поэтому необходимо учитывать чувствительность нейтронных дозиметров к фотонам.

4.12. В данных МУ рассматривается многошаровой метод спектрометрии нейтронов как метод спектрометрии, получивший наибольшее применение для широкого диапазона энергии нейтронов. Также представлены различные методы дозиметрии для целей радиационного контроля.

4.13. Выбор метода дозиметрии зависит от используемой операционной величины, характеристик нейтронного поля, внешних условий на рабочем месте, размеров, массы, стоимости дозиметров и др. Дозиметрические приборы могут быть активными с непосредственной индикацией уровня излучения и/или сигнализацией о нем или пассивными с возможностью долговременного измерения накопленной информации.

4.14. В индивидуальной дозиметрии размеры и масса дозиметров существенно влияют на выбор применяемых методов и средств измерений. При контроле рабочих мест выбор зависит от того, необходим ли непрерывный стационарный контроль или эпизодический контроль переносным прибором. В данных МУ обсуждается неопределенность, с которой могут быть определены операционные величины, и которая влияет на технические характеристики прибора.

4.15. В индивидуальной дозиметрии широко применяются следующие типы детекторов: ядерные эмульсии, термолюминесцентные, трековые, пузырьковые, полупроводниковые. В качестве средств измерений для контроля рабочих мест наиболее широко применяются дозиметры, основанные на замедлении нейтронов в различных средах. Как правило, это полиэтилен, с последующей регистрацией их детекторами тепловых нейтронов. Такие дозиметры используются в основном при энергиях нейтронов до 20 МэВ. Однако в последнее время находят применение составные замедлители с включением в состав замедлителей различных металлов, что позволяет расширить диапазон энергий регистрируемых нейтронов.

4.16. Калибровка дозиметров нейтронов в МУ рассматривается как процедура для получения калибровочного коэффициента. В зависимости от желаемой неопределенности результатов измерений необходимо для калибровки использовать поля нейтронов, характеристики которых ближе к полям на рабочих местах, чем к эталонным полям. Для нейтронных измерений чрезвычайно важным является соотношение операционных величин с флюенсом нейтронов. В настоящих МУ показана возможность расчета поправочных коэффициентов для конкретного поля в зависимости от энергетических характеристик поля нейтронов и приведены переходные коэффициенты от флюенса к эквивалентам дозы из докладов 57 МКРЕ, 74 МКРЗ для моноэнергетических нейтронов.

4.17. Нейтроны всех энергий относятся к сильнопроникающим излучениям. Нормируемой величиной при облучении нейтронами является эффективная доза. Для ограничения стохастистических эффектов применяется предел годовой эффективной дозы 20 мЗв, усредненной за 5 лет. Для ограничения же детерминированных эффектов МКРЗ рекомендует годовые пределы эквивалентной дозы в коже (500 мЗв, усредненный на любую площадь 1 см^2), в хрусталике глаза (150 мЗв) и в тканях рук и ног (500 мЗв). В стандартных условиях облучения предел эффективной дозы ограничивает эквивалентные дозы в указанных органах и тканях, но в исключительных случаях неоднородных полей нейтронного излучения возможны достижения пределов дозы в органах и тканях при непревышении предела эффективной дозы. Публикация 51 МКРЗ содержит таблицу переходных коэффициентов от флюенса к эквиваленту дозы $Hp(0,07)$ в шаре МКРЕ.

5. Дозиметрические величины

Современная система дозиметрических величин включает в себя:

– физические величины;

– нормируемые величины;

– операционные величины.

НРБ 99/2009 предписывают оценивать облучение персонала техногенными источниками ионизирующего излучения в единицах нормируемых величин, являющихся мерой ущерба от воздействия излучения на человека и не поддающихся непосредственному измерению.

В документах МКРЕ, МКРЗ и МАГАТЭ для соблюдения указанных требований введены операционные величины. Операционные величины однозначно определяются через физические величины и являются измеряемыми величинами. Значения операционных величин являются консервативными оценками нормируемых величин в стандартных условиях облучения. Дозиметрические приборы имеют градуировку в значениях операционных величин.

5.1. Физические величины

5.1.1. Основными физическими величинами являются поглощенная доза $Д$, флюенс частиц $Ф$ и керма $К$.

5.1.2. Доза – величина, используемая для оценки степени воздействия ионизирующего излучения на любые вещества, живые организмы и их ткани. В радиационной защите, радиобиологии и клинической радиологии поглощенная доза – базовая физическая величина – используется для всех видов ионизирующего излучения и любых геометрий облучения.

5.1.3. Поглощенная доза – отношение средней энергии, переданной ионизирующим излучением веществу в элементарном объеме, к массе вещества в этом объеме. Единица поглощенной дозы грэй (Гр), при этом 1 Гр = 1 Дж/кг.

5.1.4. Флюенсом частиц в случае пучка частиц называют отношение числа частиц, пересекших перпендикулярную пучку элементарную площадку за данный промежуток

времени, к площади этой площадки. В случае диффузного поля частиц, флюенс в точке определяется как отношение числа частиц, проникших в элементарную сферу с центром в этой точке, к площади поперечного сечения этой сферы. Единицы измерения флюенса – $м^{-2}$ (СИ). 1 $м^{-2}$ – такой флюенс, при котором в объем сферы с площадью поперечного сечения 1 $м^2$ попадает одна частица.

5.1.5. Керма – сумма начальных кинетических энергий всех заряженных частиц, освобожденных незаряженным ионизирующим излучением (таким, как фотоны или нейтроны) в образце вещества, отнесенная к массе образца. Керма в общем случае отличается от поглощенной дозы. Единица кермы — джоуль на килограмм, или грей, Гр; 1 Гр = 1 Дж/кг.

5.2. Нормируемые величины

5.2.1. При облучении биологического объекта одной и той же поглощенной дозой, но разными ионизирующими излучениями, получаются разные биологические эффекты. Для учета биологических эффективностей излучений каждому виду ионизирующих излучений присваиваются взвешивающие коэффициенты излучения. Эквивалентная доза рассчитывается путем умножения значения поглощенной дозы в органе или ткани на соответствующий взвешивающий коэффициент для данного вида излучения.

5.2.2. Единицей измерения эквивалентной дозы в международной системе единиц (СИ) является Дж/кг, которая получила название зиверт (Зв). 1 Зв – такое количество энергии любого вида излучения, поглощенной в 1 кг биологической ткани, при котором наблюдается такой же биологический эффект, как и поглощенной дозе в 1 Гр фотонного излучения.

5.2.3. При внешнем облучении персонала группы А в нормальных условиях эксплуатации источников излучения согласно НРБ-99/2009, нормируются дозиметрические величины, приведенные в Таблице 5.1.

Таблица 5.1 *- Нормируемые величины облучения персонала группы А и пределы дозы облучения в нормальных условиях эксплуатации ИИИ*

Нормируемая величина	Значение предела, мЗв
Годовая эффективная доза	50
Годовая эффективная доза, усредненная за любые последовательные 5 лет	20
Эффективная доза, накопленная за период трудовой деятельности (50 лет)	1000
Годовая эквивалентная доза облучения хрусталика глаза	150
Годовая эквивалентная доза облучения кожи	500
Годовая эквивалентная доза облучения кистей и стоп	500
Месячная эквивалентная доза на поверхности нижней части области живота женщин в возрасте до 45 лет	1

5.3. Операционные величины

5.3.1. Оценка дозы при воздействии внешних источников излучения выполняется на основе результатов ИДК с помощью индивидуальных дозиметров. В случаях, когда такой контроль невозможен или нецелесообразен, оценка дозы выполняется по результатам измерения амбиентного эквивалента дозы при дозиметрическом контроле рабочих мест (далее – ДКРМ). Оценка дозы также может быть выполнена путем расчета на основании характеристик полей излучения согласно МУ 2.6.5.028-2016.

5.3.2. Нейтроны всех энергий относятся к сильнопроникающим излучениям, поэтому операционной величиной для ИДК внешнего облучения нейтронами является ин-

дивидуальный эквивалент дозы $H_P(10)$. Единица индивидуального эквивалента дозы – зиверт (Зв).

5.3.3. Соответствие между нормируемой и операционной величинами, используемыми в ИДК, представлено в Таблице 5.2.

***Таблица 5.2** - Соответствие между нормируемой и операционной величинами при ИДК облучения нейтронами*

Нормируемая величина	Операционная величина: индивидуальный эквивалент дозы		
	Положение индивидуального дозиметра	*d*, мм	Условное обозначение
Эффективная доза внешнего облучения	На нагрудном кармане спецодежды либо внутри него	*10*	$H_P(10)$

5.3.4. Операционной величиной для дозиметрического контроля рабочих мест при облучениях нейтронами является амбиентный эквивалент дозы $H^*(10)$. Единица эквивалента дозы – зиверт (Зв). Соответствие между нормируемыми и операционной величинами при дозиметрическом контроле рабочих мест представлено в Таблице 5.3.

***Таблица 5.3** - Соответствие между нормируемыми и операционной величинами при ДКРМ при облучениях нейтронами*

Нормируемая величина	Операционная величина: амбиентный эквивалент дозы	
	d, мм	Условное обозначение
Эффективная доза внешнего облучения	10	$H^*(10)$
Эквивалентная доза внешнего облучения на поверхности нижней части области живота женщин	10	$H^*(10)$

Мощность амбиентного эквивалента дозы является производной величиной от амбиентного эквивалента дозы облучения и используется как характеристика радиационной обстановки для непрерывных полей излучения. Допускается использовать данную величину для характеристики импульсного излучения при условии, что временной интервал для усреднения больше, чем характерное время изменения уровня излучения. Единица мощности эквивалента дозы – зиверт в час (Зв/ч).

Особенности дозиметрического контроля рабочих мест электронными дозиметрами при облучениях импульсными полями нейтронного излучения рассматриваются в Приложении 5.

6. Содержание контроля облучения нейтронами

6.1. Виды ИДК облучения нейтронами

6.1.1. Для контроля индивидуальной дозы профессионального облучения персонала нейтронами применяются:

– ИДК внешнего облучения с применением индивидуальных дозиметров, заключающийся в определении индивидуального эквивалента дозы облучения работника с помощью учетных (накопительных) дозиметров за определенный промежуток времени;

– ИДК по результатам ДКРМ, включающий измерение мощности амбиентного эквивалента дозы или интегральной амбиентной дозы (за период контроля) нейтронного излучения при контроле непрерывных полей излучения, а также времени пребывания

работника в этих условиях; для импульсных и изменяющихся во времени полей излучения учитывается корреляция времени пребывания работника в этих условиях и характера измерения уровня излучения во времени;

– ИДК по результатам ДКРМ, состоящего в определений энергетического распределения плотности потока нейтронов при контроле непрерывных полей излучения, а также времени пребывания работника в этих условиях.

6.1.2. ИДК нейтронов имеет своей целью оценку значений полученной персоналом дозы облучения нейтронным излучением.

6.1.3. ДКРМ имеет целью получение информации о радиационной обстановке на рабочих местах персонала и прогноз и оценку дозы облучения персонала нейтронным излучением на контролируемых рабочих местах.

6.1.4. Для целей контроля профессионального облучения период контроля определяется как промежуток времени: между последовательными считываниями индивидуальных учетных дозиметров для ИДК или для ДКРМ (при использовании интегральных дозиметров); либо между последовательными измерениями характеристик радиационной обстановки на рабочих местах при проведении ДКРМ.

6.2. Критерии введения ИДК нейтронного излучения

6.2.1. Для контроля облучения персонала группы А, включая прикомандированных лиц и персонал привлеченных организаций, в планируемых условиях облучения установлены уровни введения ИДК ($У_{ВК}$) для контроля внешнего облучения нейтронами с помощью индивидуальных дозиметров, размещаемых на теле работника.

6.2.2. Если по имеющимся данным значение годовой дозы облучения работника на всех его рабочих местах не превышает или по прогнозу не может превысить $У_{ВК}$, то индивидуальный дозиметрический контроль может осуществляться путем проведения ДКРМ, по результатам которого проводится определение индивидуальной дозы облучения каждого работника. Значения индивидуальной дозы облучения каждого работника, рассчитанные по результатам ДКРМ, регистрируются и хранятся в установленном порядке.

6.2.3. $У_{ВК}$ для контроля эффективной дозы внешнего фотонного излучения не установлены. Для всего персонала группы А является обязательным ношение индивидуальных дозиметров фотонного излучения в течение всего времени нахождения в зоне контролируемого доступа.

Критерии введения ИДК приведены в Таблице 6.1.

Таблица 6.1 *- Критерии введения ИДК с помощью индивидуальных дозиметров для контроля внешнего облучения*

Контролируемая величина	$У_{ВК}$, мЗв
Годовая эффективная доза внешнего облучения любым излучением, кроме фотонного	1

6.2.4. Дозу профессионального облучения персонала группы Б определяют путем проведения ДКРМ.

6.2.5. Организация ИДК персонала, работающего с источниками импульсного ионизирующего излучения, устанавливается отдельными методическими документами.

6.3. Определение индивидуальной дозы облучения персонала нейтронами с помощью ИДК

6.3.1. ИДК внешнего облучения персонала нейтронами в условиях контролируемого облучения осуществляется в двух видах:

– текущий ИДК, целью которого является измерение индивидуального эквивалента дозы $H_P(10)$ для учета дозы облучения персонала;

– оперативный ИДК, служащий целям контроля дозы облучения.

6.3.2. ИДК облучения нейтронами заключается в измерении индивидуального эквивалента дозы $H_P(10)$. Нейтронное излучение сопровождается фотонным излучением. Индивидуальные дозиметры нейтронов применяются в дополнение к индивидуальным дозиметрам фотонного излучения. Используемые системы ИДК должны обеспечивать раздельную регистрацию компонентов излучения.

6.3.3. Для текущего ИДК применяются индивидуальные пассивные дозиметры учетного накопительного типа, например, термолюминесцентные дозиметры. Одной из основных характеристик дозиметров учетного типа, допускающих их применение для текущего ИДК, является невозможность внешних влияющих факторов разрушить хранящуюся в них информацию о дозе без применения специальных методов воздействия на детектор (например, нагрева или травления и т. д.).

6.3.4. Для оперативного контроля (непосредственно во время выполнения работ в радиационно-опасных условиях) дополнительно к пассивным дозиметрам может применяться электронный прямопоказывающий дозиметр (далее ЭПД) нейтронного излучения с сигнальными функциями. Также там, где значения мощности эквивалента дозы нейтронного излучения на рабочем месте могут существенно различаться со временем, для целей оперативного контроля дозы следует применять ЭПД. Такие дозиметры могут давать оперативную информацию при быстром изменении параметров поля нейтронного излучения и обеспечивают подачу звуковых и световых сигналов при превышении установленных уровней дозы или мощности дозы нейтронного излучения.

6.3.5. Оперативный ИДК осуществляется в течение ограниченного периода времени, как правило, не превышающего 1 смену или 1 сутки. Оперативный ИДК служит для контроля дозы облучения персонала, а также для получения информации о мощности дозы нейтронного излучения в целях проверки адекватности дозиметрического контроля рабочих мест. Для оперативного ИДК применяются ЭПД нейтронного излучения или дозиметры на основе ионизационных камер непосредственного считывания. Дозиметры нейтронного излучения на основе ионизационных камер пригодны к применению для дозиметрии импульсного излучения и в присутствии сильных электромагнитных полей. Однако ЭПД нейтронного излучения могут давать ошибочные показания в ситуациях, когда в полях встречается импульсное излучение с высокой мощностью дозы излучения или при наличии электромагнитных полей в окружающей среде.

6.3.6. В связи с вышеуказанным, ЭПД нейтронного излучения следует использовать только для оперативного контроля, относящегося к одной смене (суткам), с целью контроля дозы облучения, и применение ЭПД для текущего ИДК облучения нейтронами не рекомендуется.

6.3.7. Для оценки дозы облучения работника нейтронами достаточно измерить величину $H_P(10)$. Дозиметры фотонного и нейтронного излучения $H_P(10)$ фиксируются на груди персонала принятым на данном предприятии способом (карманы в спецодеждах, завязки др.).

6.3.8. Частоту смены дозиметров следует устанавливать в зависимости от вида выполняемой работы, ожидаемого облучения, связанного с работой, и диапазона измерения дозиметров. График обмена дозиметров разрабатывается исходя из практики радиационного контроля на предприятии и утверждается ответственным за радиационный контроль лицом предприятия.

6.3.9. За значение эффективной дозы внешнего облучения персонала нейтронами в стандартных условиях облучения следует принимать значение соответствующей операционной величины ИДК с коэффициентом: $Евнеш. = k \times H_P(10)$.

Коэффициент k устанавливается на каждом предприятии соответствующими методическими документами на основании дополнительных исследований условий облучения нейтронами на рабочих местах. В стандартных условиях облучения, когда неравномерность облучения меньше 2 и спектр нейтронов достаточно близок к спектру, в котором проводилась калибровка дозиметров, $k = 1$.

6.3.10. Организация индивидуального дозиметрического контроля персонала, работающего в нестандартных условиях облучения, устанавливается отдельными методическими документами.

6.4. Определение индивидуальной дозы облучения персонала нейтронами посредством ДКРМ

6.4.1. ДКРМ заключается в измерении значений мощности амбиентного эквивалента дозы нейтронов $H^*(10)$ на рабочих местах при воздействии непрерывного излучения или измерении амбиентной дозы на рабочих местах интегральными дозиметрами (например, теми же дозиметрами ИДК, установленными на фантомах).

6.4.2. Оценка значений прогнозируемой годовой эффективной дозы нейтронов при воздействии непрерывного нейтронного излучения производится умножением значений мощности амбиентного эквивалента дозы $H^*(10)$ в единицах мкЗв/ч на рабочее время в часах в течение года. При наличии у персонала нескольких рабочих мест с разными значениями мощности дозы нейтронов за значение эффективной дозы внешнего облучения нейтронами следует принимать сумму произведений значений мощности дозы на длительность пребывания персоналом на рабочем месте с данным значением мощности дозы.

6.4.3. При оценке значений прогнозируемой эффективной дозы нейтронов при воздействии импульсного нейтронного излучения посредством контроля рабочих мест проводятся измерения амбиентного эквивалента дозы. Затем производится расчет отношения измеренного значения эквивалента дозы к значению параметра работы источника при выработке данного значения дозы. Для оценки эффективной дозы нейтронов персонала, пребывающего на контролируемом рабочем месте в полях импульсных излучений в течение года, нужно рассчитанное отношение умножить на значение параметра работы источника за год в соответствии с методикой выполнения измерений. Дозиметрия импульсного нейтронного излучения более подробно рассматривается в Приложении 5.

6.4.5. ДКРМ может состоять в определении энергетического распределения плотности потока нейтронов на рабочем месте. В этом случае оценку значений прогнозируемой эффективной дозы нейтронов при воздействии непрерывного нейтронного излучения можно провести в соответствии с МУ 2.6.5.028-2016.

7. Требования к регистрации и хранению результатов индивидуального дозиметрического контроля

7.1. Результаты ИДК должны быть зарегистрированы в форме, принятой на предприятии, в одной из следующих форм:

– индивидуальные дозиметрические карты в бумажном варианте;

– базы данных ИДК на персональных компьютерах;

– и др.

7.2. Объем сохраняемой информации определяется следующими задачами:

– статистической отчетностью перед органами государственного контроля;

– определением годовой эффективной дозы внешнего облучения персонала;

– отслеживанием динамики изменения всех контролируемых радиационных параметров, характеризующих состояние радиационной обстановки;

– и др.

7.3. Срок хранения результатов индивидуального контроля дозы облучения персонала должен составлять 50 лет.

7.4. В случае, если значение измеряемой величины меньше нижней границы диапазона измерения измерительного средства ИДК, результат контроля регистрируется равным 50% нижней границы диапазона измерения, как указано в Руководстве по безопасности МАГАТЭ RS-G-1.8. Нижняя граница диапазона измерения средства ИДК не равна нулю и значение измеренной дозы находится в диапазоне от нуля до значения нижней границы диапазона измерения. Если предположить равномерное распределение значения дозы, то наиболее вероятное значение дозы равно 50% нижней границы диапазона измерения.

8. Классификация приборов контроля нейтронного излучения

8.1. Для контроля нейтронного излучения используются дозиметрические и радиометрические приборы. Дозиметрические приборы предназначены для измерения операционных дозиметрических величин: амбиентного и индивидуального эквивалентов доз. Радиометрические приборы измеряют физические величины: активность или число ионизирующих частиц. Физические величины, измеряемые радиометрическими приборами, лишь косвенно связаны с дозой облучения.

8.2. Приборы контроля нейтронного излучения подразделяются по контролируемому радиационному параметру на приборы, измеряющие:

– амбиентный эквивалент дозы;

– мощность амбиентного эквивалента дозы;

– индивидуальный эквивалент дозы;

– мощность индивидуального эквивалента дозы;

– флюенс нейтронов;

– плотность потока нейтронов;

– энергетическое распределение нейтронов (спектрометры).

8.3. Приборы контроля нейтронного излучения подразделяются по техническим характеристикам, таким как: диапазон измерения, диапазон энергии регистрируемых нейтронов, масса-габаритные характеристики.

8.4. Нейтронное излучение сопровождается фотонным излучением, поэтому индивидуальные дозиметры нейтронов применяются вместе с индивидуальными дозиметрами фотонного излучения. Данные системы ИДК должны обеспечивать раздельную регистрацию компонентов излучения.

8.5. Приборы контроля нейтронного излучения подразделяются на классы:

– средства измерения;

– индикаторы.

8.6. Приборы контроля нейтронного излучения подразделяются по временному характеру контроля:

– непрерывный контроль;

– эпизодический (инспекционный) контроль;

– периодический текущий контроль.

8.7. К приборам непрерывного контроля относится контроль в составе автоматизированных систем радиационного контроля (АСРК). Непрерывный контроль предполагает сбор информации количественного характера, который не требует длительных наблюдений, но показывает тенденцию развития радиационной обстановки. К эпизодическому (инспекционному) контролю относится, например, дозиметрический контроль рабочих мест с целью оценки условий труда. Текущий контроль индивидуальной дозы осуществляется, например, при ИДК внешнего облучения, при этом оперативный ИДК с применением электронных дозиметров относится к эпизодическому (инспекционному) контролю.

8.8. Приборы контроля нейтронного излучения подразделяются по исполнению, связанному с местом размещения и способом применения при эксплуатации:

– стационарные;

– переносные;

– носимые на теле средства для индивидуального контроля.

8.9. Стационарный прибор постоянно установлен на месте пользования и примером такового может послужить дозиметр нейтронов в составе АСРК. Переносной дозиметр нейтронов применяется при ДКРМ. Средства для индивидуальной дозиметрии, носимые на теле, подразделяются на приборы текущего контроля на базе пассивных дозиметров и приборы оперативного контроля на основе электронных дозиметров.

8.10. В зависимости от типа размещения предъявляются разные требования к механическим, электрическим, электромагнитным свойствам приборов в соответствии со стандартом МЭК 62706.

8.11. Приборы контроля нейтронного излучения подразделяются по методам измерения. Нейтроны, как незаряженные частицы, при прохождении через вещество не вызывают ионизацию, поэтому для регистрации нейтронов используются ядерные реакции, при которых возникают заряженные частицы, вызывающие ионизацию. Методы дозиметрии нейтронов будут рассмотрены в Приложении 4.

8.12. Приборы контроля нейтронного излучения подразделяют по характеру полей: приборы, контролирующие параметры непрерывных полей, и приборы, контролирующие параметры импульсных полей. Дозиметрия импульсных полей ионизирующего излучения имеет особенности, обсуждаемые в МУ 2.6.5.037-2016 и в Приложении 5 настоящих МУ.

8.13. В помещениях, где ведутся работы с нейтронными источниками с выходом нейтронов более 10^9 нейтр./с, с делящимися материалами в количествах, при которых возможно возникновение самоподдерживающейся цепной реакции деления, а также на ядерных реакторах и критических сборках и при других работах I класса с открытыми источниками излучения, где радиационная обстановка при проведении работ может существенно изменяться, необходимо применять приборы радиационного контроля со звуковыми и световыми сигнализирующими устройствами.

9. Неопределенность результатов дозиметрического контроля нейтронов

9.1. Неопределенность измерения есть параметр, связанный с результатом измерения, который характеризует дисперсию значений, которые могли бы быть обоснованно приписаны измеряемой величине.

9.2. Неопределенность нахождения значений эффективной дозы нейтронов по показаниям индивидуального дозиметра имеет несколько составляющих: предел основной и дополнительных погрешностей измерения индивидуального эквивалента дозы, погрешность определения поправочных коэффициентов, погрешность перехода от индивидуального эквивалента дозы к эффективной дозе, сопутствующее фотонное излучение и др.

9.3. Величина $H_P(10)$, измеренная с помощью индивидуального дозиметра, расположенного на груди, дает достаточно точное представление об эффективной дозе облучения нейтронами, по крайней мере, для «передне-задней» геометрии облучения. Таким образом, один дозиметр, расположенный на торсе спереди, как правило, позволяет удовлетворительно оценить эффективную дозу. Однако если доза приближается к установленному пределу, следует вводить для других геометрий облучения соответствующий корректирующий коэффициент, основанный на информации об излучении и условиях облучения.

9.4. Из соображений, связанных с характеристиками отклика используемых в настоящее время индивидуальных нейтронных дозиметров, можно сделать вывод, что в случае с нейтронным излучением имеются трудности в удовлетворении критериев оценки эффективной дозы с помощью индивидуального эквивалента дозы. Однако вклад в общую дозу нейтронов из тех частей энергетического спектра, где имеются наибольшие трудности, обычно невелик. На практике для единичных измерений в реальных полях на рабочих местах достижимо значение стандартной неопределенности 50%. Использование поправочного коэффициента, определенного для поля на конкретном рабочем месте, должно позволить достичь значения суммарной неопределенности оценки годовой эффективной дозы в пределах коэффициента 1,5.

9.5. Если внешнее поле имеет как фотонную, так и нейтронную компоненты, общая неопределенность получается из неопределенностей для двух измерений. Если, как это обычно бывает, фотонная компонента преобладает, неопределенность для нейтронной компоненты может быть больше при том, что критерий по общей неопределенности для суммарной дозы будет удовлетворен. При оценке неопределенности также бывает необходимым включение в рассмотрение вкладов в эффективную дозу от поступления радиоактивности в организм человека. Для этих вкладов неопределенности могут быть существенно выше 50%.

9.6. Использование знаний об энергетическом и угловом спектрах поля на рабочих местах позволяет снизить неопределенность оценки дозы с помощью применения поправочного коэффициента. Его можно определить путем проведения калибровок на рабочем месте или с помощью информации о характеристиках поля на рабочих местах и энергетических и угловых характеристиках дозиметра.

9.7. Дозиметры нейтронов не могут дать с одинаковой неопределенностью информацию о дозе во всем возможном диапазоне энергии нейтронов от тепловых до сверхбыстрых вследствие хода их энергетической зависимости чувствительности. При необходимости возможно измерение спектров нейтронов на рабочих местах для получения более точной информации о дозе облучения персонала.

10. Калибровка дозиметров нейтронов

10.1. Требования к калибровке дозиметров нейтронов

10.1.1.Требования к калибровке дозиметров нейтронов изложены в стандартах ИСО 8529, ИСО 12789 и в докладе 66 МКРЕ.

10.1.2. В качестве эталонных полей нейтронов в стандарте ИСО 8529 рассматриваются четыре поля на основе трех радионуклидных источников:

– калифорний-252 (^{252}Cf);

– калифорний-252 (^{252}Cf) в замедлителе из тяжелой воды;

– изотоп америция-241 с бором (^{241}Am-B(α,n));

– изотоп америция-241 с бериллием (^{241}Am-Be(α,n)).

10.1.3. В России в качестве эталонного поля нейтронов применяется поле изотопа плутония с бериллием (^{238}Pu-Be(α,n)). Такая замена радионуклида ^{241}Am-Be не влияет на характеристики поля нейтронного излучения, которые определяются реакцией (α,n) на ядрах бериллия, но соотношение дозы гамма- и нейтронного излучения будет другим. Зависимость оценки неопределенности определения дозы отдельных компонент в поле смешанного гамма-нейтронного излучения от соотношения дозы гамма- и нейтронного излучения рассматривается в Приложении 6.

10.1.4. Данные по источникам, включая переходные коэффициенты между операционными величинами и флюенсом нейтронов, приведенные в вышеуказанных доку-

ментах, относятся к излучениям источников в т. н. «открытой» геометрии, для которой нужны помещения больших размеров.

В Приложении В стандарта ИСО 8529-2 приведены требования к длине помещения при 40% вкладе отраженного излучения для рекомендуемых ИСО источников. Например, для работы с альбедными дозиметрами с применением источника ^{241}Am-Be требуется помещение с размерами 8,2×8,2×8,2 м. В связи с этим на практике применяются метрологические установки типа УКПН с коллиматорами, для которых все данные должны быть рассчитаны и/или измерены для установки с конкретными характеристиками и в конкретном помещении.

10.1.5. Надежное измерение операционных величин нейтронов является трудной задачей, осложненной широким диапазоном энергий нейтронов и несовершенством большинства дозиметров нейтронов. Калибровка дозиметров нейтронов играет важную роль в дозиметрии нейтронов.

10.1.6. Калибровка состоит в установлении соотношений между показаниями дозиметра и соответствующим условно истинным значением измеряемой величины для всего диапазона энергии и углов падения нейтронного излучения. Работоспособность дозиметра при воздействии всевозможных влияющих факторов устанавливается при типовых испытаниях в соответствии с требованиями стандартов МЭК и ИСО. Требования стандартов приведены в Приложении 3.

10.1.7. Результатом калибровки является *калибровочный коэффициент N*, полученный *в стандартных условиях калибровки*:

$$N = H/M,$$

где M – показание прибора, H – условно истинное значение измеряемой величины, например, эквивалента дозы.

Все дозиметры должны проходить периодическую поверку с межповерочным интервалом, устанавливаемым при испытаниях типа. В случае неудовлетворительного результата поверки дозиметры подлежат повторной калибровке.

10.1.8. Стандартные условия калибровки также указываются в методике поверки прибора, утверждаемой при испытаниях с целью утверждения типа, эти условия включают эталонное излучение, определенный диапазон внешних условий и определенную ориентацию детектора прибора к излучению.

10.1.9. В связи с тем, что отклик большинства дозиметров нейтронов зависит от энергии и угла падения излучения, показания дозиметров в стандартных условиях калибровки и в рабочих местах могут отличаться. В то же время в типичных рабочих местах, например, вблизи от транспортных контейнеров, содержащих отработанное топливо, или в помещениях производства радионуклидных источников нейтронов, или вблизи от ускорителей частиц высоких энергий и при полетах на высотах 10–15 км, поля нейтронов имеют типичные характеристики.

Стандарты ИСО 12789 посвящены вопросам методов моделирования и описания полей нейтронов с энергиями от тепловых до нескольких сот ГэВ на рабочих местах на основе радионуклидных источников, исследовательских реакторов и ускорителей.

10.1.10. При проведении калибровки дозиметров нейтронов в нейтронных полях на рабочих местах можно получить *поправочный коэффициент k для конкретного поля* нейтронов:

$$H = M \cdot N \cdot k.$$

10.2. Калибровка в стандартных условиях калибровки

10.2.1. При калибровке в стандартных условиях калибровки необходимо описать условия калибровки с указанием эталонного излучения, калибровочной установки и используемых переходных коэффициентов. В связи с отсутствием эталонного прибора-пе-

реносчика единицы мощности амбиентного эквивалента дозы первичной величиной для калибровки нейтронных измерителей является флюенс. Но в области радиационной безопасности и контроля радиационной обстановки дифференциальная энергетическая плотность потока нейтронов используется как вспомогательная величина для расчета величины амбиентного эквивалента дозы и индивидуального эквивалента дозы с использованием коэффициентов перехода от флюенса нейтронов определенного спектра к значению эквивалента дозы нейтронов того же спектра.

10.2.2. *Калибровочный коэффициент* присущ конкретному прибору и не зависит от экспериментальной техники, используемой при калибровке. Поэтому при калибровке необходимо определить поправки на влияние рассеянного от стен помещения излучения и других посторонних эффектов так, чтобы калибровочный коэффициент был независим от этих эффектов. Процедуры определения поправок на влияющие факторы описаны в стандарте ИСО 8529-2.

10.2.3. Так как нейтроны всех энергий относятся к сильнопроникающим излучениям, переносные дозиметры нейтронов калибруются в единицах амбиентного эквивалента дозы $H^*(10)$, а индивидуальные дозиметры в единицах индивидуального эквивалента дозы $H_P(10)$. Индивидуальные дозиметры нейтронов носятся на груди, поэтому для их калибровки необходим фантом. В связи с практическими проблемами применения шара МКРЕ, как фантома для калибровки индивидуальных дозиметров, МКРЕ рекомендовал пластину 30×30×15 см из полиметилметакрилата (ПММА) в качестве физического фантома для калибровки индивидуальных дозиметров. Для расчетов переходных коэффициентов МКРЕ рекомендовал четырехэлементный тканеэквивалентный фантом аналогичных размеров и формы. Немного позже водный фантом ИСО размерами 30×30×15 см со стенками из ПММА (передняя стенка толщиной 2,5 мм, другие стенки толщиной 10 мм) был рекомендован как физический фантом. В любом случае, при использовании водного фантома ИСО или ПММА фантома, нет никакой необходимости в поправках на обратное рассеяние между физическим фантомом и тканеэквивалентным фантомом МКРЕ.

В Приложении 6 приведены сравнения результатов расчетов и экспериментов с применением данных фантомов.

10.2.4. В стандарте ИСО 8529-1 обсуждаются эталонные излучения с использованием реакторов и ускорителей и рекомендуются четыре источника на основе радионуклидов: ^{252}Cf, ^{252}Cf в замедлителе из тяжелой воды, ^{241}Am-B, ^{241}Am-Be. Дозиметрические параметры этих источников приведены в Приложении 7. В России в качестве источника эталонного поля применяется источник ^{238}Pu-Be(α,n), в дополнение к вышеуказанным источникам может также применяться источник ^{241}Am-Li(α,n).

10.2.5. Значения величин переходных коэффициентов от флюенса к эквивалентам дозы из доклада 74 МКРЗ и доклада 57 МКРЕ также приведены в Приложении 7. В случае с $H_P(10)$ значения переходных коэффициентов приведены как функция от угла падения излучения на поверхность плоского тканеэквивалентного фантома МКРЕ. Значения переходных коэффициентов приведены для моноэнергетических нейтронов. На практике нельзя применять коэффициенты, приведенные в стандарте ИСО 8529-3 для спектра источников в условиях «открытой геометрии», без учета вклада рассеянных нейтронов.

10.2.6. Необходимо заметить, что в рассмотрении величины $H_P(10)$ необходимо учитывать зависимость от направления излучения. Поля излучения на рабочих местах изотропны, поэтому при калибровке также необходимо использовать излучения вращения, т. е. прибор необходимо вращать в эталонном поле.

10.2.7. Для уверенности в том, что *калибровочный коэффициент* переносного дозиметра нейтронов не изменился между калибровками, необходим *проверочный источник* к дозиметру. *Проверочный источник* необходимо закреплять в фиксированном держателе, обеспечивающем одинаковую позицию относительно прибора. Также необходимо

проверять дозиметр перед отправкой на калибровку и после получения из калибровки. Такая проверка *до* и *после* удостоверяет то, что *калибровочный коэффициент* не изменился при перевозке.

10.3. Поправки для конкретных полей нейтронов

10.3.1. Наиболее часто используемым методом спектрометрии нейтронов для калибровки является многошаровой метод спектрометрии и использование спектров для определения переходных коэффициентов флюенс–эквивалент дозы. Наличие реальных переходных коэффициентов дает возможность определения условно истинного значения мощности дозы нейтронов, которое сравнивается с показаниями дозиметров нейтронов для определения *поправочного коэффициента для конкретного поля* нейтронов.

10.3.2. Многошаровой метод обеспечивает спектрометрию нейтронов от тепловых энергий до 20 МэВ. Присущее данному методу низкое разрешение не служит препятствием для его применения для определения переходных коэффициентов флюенс–эквивалент дозы, т. к. зависимость функции флюенс–эквивалент дозы от энергии не имеет тонкой структуры.

10.3.3. Поправочный коэффициент для альбедных дозиметров

Как указано в докладе 66 МКРЕ, исследованиями показано, что нейтронный дозиметр с диаметром замедлителя 22,86 см (9 дюймов) имеет энергетическую зависимость идентичную энергетической зависимости амбиентного эквивалента дозы, дозиметр с диаметром замедлителя 7,62 см (3 дюйма) имеет энергетическую зависимость идентичную энергетической зависимости альбедного дозиметра. Поэтому, один раз определив результаты измерения двумя дозиметрами, для получения истинного значения эквивалента дозы необходимо показания альбедного дозиметра умножить на отношение результатов измерения. В то же время, как предупреждают авторы исследований, для конкретных дозиметров и конкретных полей данный метод нужно применять с осторожностью. Для практики применяется разработанный в ИФВЭ и ОИЯИ, описанный в Дополнении Б Приложения 2 данных МУ метод введения поправочных коэффициентов к показаниям альбедных дозиметров, основанный на совместных измерениях альбедными дозиметрами и дозиметром ДКС-96Н.

10.4. Проверка стабильности поля нейтронов

10.4.1. При использовании полученного значения *поправочного коэффициента для конкретного поля* нейтронов необходимо периодически убеждаться в неизменности поля нейтронов. Особенно это важно для исследовательских лабораторий, где нейтронные поля при разных экспериментах могут изменяться.

10.4.2. Отношение показаний дозиметров с диаметрами замедлителей 22,86 см (9 дюймов) и 7,62 см (3 дюйма) можно определить как *индекс жесткости спектра,* при этом диаметры замедлителей могут быть иными с сохранением примерного соотношения диаметров. Неизменность значения вышеуказанного отношения означает стабильность спектральной характеристики поля нейтронов.

Библиография

1. Государственная система обеспечения единства измерений. Излучения ионизирующие и их измерения. Термины и определения. Рекомендации по межгосударственной стандартизации РМГ 78-2005. Межгосударственный совет по стандартизации, метрологии и сертификации, 2005.

2. Руководство ИСО по выражению неопределенности измерения, ГП «ВНИИМ», С.-Петербург, 1999.

3. **IAEA.** *Neutron Monitoring for Radiological Protection.* Technical Reports Series № 252– IAEA, Vienna (1982).

4. **IAEA.** *Radiation Protection and the Safety of Radiation Sources: Safety Fundamentals.* Safety Series № 120. – IAEA, Vienna (1996).

5. **IAEA.** *International Basic Safety Standards for Protection against Ionizing Radiation and for the Safety of Radiation Sources.* Safety Series № 115. – IAEA, Vienna (1996).

6. **IAEA.** *Assessment of Occupational Exposures to External Radiation,* Safety Guide № RS-G-1.3. – IAEA, Vienna (1999).

7. **IAEA.** *Environmental and Source Monitoring for Purposes of Radiation Protection,* Safety Guide RS-G-1.8. – IAEA, Vienna (2005).

8. **IAEA.** *Radiaton Protection and Safety of Radiation Sources: International Basic Safety Standards. General Safety Requirements,* Safety Standards Series No. GSR Part 3 - IAEA, Vienna (2014).

9. **ICRP.** *1990 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection.* ICRP Publication 60. – Pergamon Press, Oxford (1991).

10. **ICRP/ICRU.** *Conversion Coefficients for Use in Radiological Protection against External Radiation.* Report of the Joint Task Group. – ICRP Report 74 (1997), ICRU Report 57 (1997).

11. **ICRP.** *General Principles for the Radiation Protection of Workers.* – ICRP Publication 75. – Pergamon Press, Oxford (1997).

12. **ICRP.** *Conversion Coefficients for Radiological Protection Quantities for External Radiation Exposures.* – ICRP Publication 116, Pergamon Press, Oxford (2010).

13. **ICRP.** *Рекомендации 2007 года Международной комиссии по радиационной защите,* Публикация 103 МКРЗ.

14. **ICRU.** *Determination of Dose Equivalents from External Radiation Sources.* – ICRU Report 39, Bethesda, MD (1985).

15. **ICRU.** *Determination of Dose Equivalents from External Radiation Sources.* – Part 2. – ICRU Report 43, Bethesda, MD (1988).

16. **ICRU.** *Determination of Dose Equivalents from External Radiation Sources.* – Part 3. – ICRU Report 47, Bethesda, MD (1992).

17. **ICRU.** *Quantities and Units in Radiation Protection Dosimetry.* – ICRU Report 51, Bethesda, MD (1993).

18. **ICRU.** *Determination of Operational Dose Equivalent Quantities for Neutrons.* – ICRU Report 66, Bethesda, MD (2001).

19. **IEC** 61322, 1994-11, *Radiation protection instrumentation - Installed dose equivalent rate meters, warning assemblies and monitors for neutron radiation of energy from thermal to 15 mev.*

20. **IEC** 61005, 2003-02, *Radiation protection instrumentation - Neutron ambient dose equivalent (rate) meters.*

21. **IEC** 61066 ed. 2, 2006-06, *Radiation protection instrumentation - Thermoluminescence dosimetry systems for personal and environmental monitoring.*

22. **IEC** 60846-2, 2007-07, *Radiation protection instrumentation – Ambient and/or directional dose equivalent (rate) meters and/or monitors for beta, X and gamma radiation – Part 2: High range beta and photon dose and dose rate portable instruments for emergency radiation protection purposes.*

23. **IEC** 60846-1, 2009-04, *Radiation protection instrumentation – Ambient and/or directional dose equivalent (rate) meters and/or monitors for beta, X and gamma radiation – Part 1: Portable workplace and environmental meters and monitors.*

24. **IEC** 61526, ed 3, 2010-07, *Radiation protection instrumentation – Measurement of personal dose equivalents Hp(10) and Hp(0,07) for X, gamma, neutron and beta radiations – Direct reading personal dose equivalent meters.*

25. **IEC**/TS 62743, 2012, *Radiation protection instrumentation – Electronic counting dosemeters for pulsed fields of ionizing radiation.*

26. **IEC** 62387, ed.1, 2012-12-04, *Radiation protection instrumentation – Passive integrating dosimetry systems for personal and environmental monitoring of photon and beta radiation.*

27. IEC TR 62461, 2006-12, *Radiation protection instrumentation – Determination of uncertainty in measurement.*

28. **IEC** 62706, ed.1, 2012-12, *Radiation protection instrumentation – Environmental, electromagnetic and mechanical performance requirements.*

29. **ISO**. *General Requirements for the Competence of Calibration and Testing Laboratories.* – ISO/IEC Guide 25 (1990).

30. **ISO**. *Guide to Expression of Uncertainty in Measurement.* – ISBN-92-67-10188-9, ISO, Geneva (1993).

31. **ISO** 8529-3, ed. 1, 1998-11, *Reference neutron radiation – Part 3: Calibration of area and personal dosimeters and determination of their response as a function of neutron energy and angle of incidence.*

32. **ISO** 8529-2, ed. 1, 2000-08, *Reference neutron radiation – Part 2: Calibration fundamentals of radiation protection devices relates to basic quantities characterizing the radiation field.*

33. **ISO** 8529-1, ed. 1, 2001-02, *Reference neutron radiation – Part 1: Characteristics and methods of production.*

34. **ISO** 21909, ed. 1, 2005-06, *Radiation protection. Passive personal neutron dosemeters – Performance and test requirements.*

35. **ISO** 12789-1, ed. 1, 2008-03, *Reference radiation fields – Simulated workplace neutron fields –Part 1: Characteristics and methods of production.*

36. **ISO** 12789-2, ed. 1, 2008-03, *Reference radiation fields – Simulated workplace neutron fields – Part 2: Calibration fundamentals related to the basic quantities.*

37. **ISO/TS** 18090-1, ed. 1, 2015-08, *Radiological protection – Characteristics of reference pulsed radiation – Part 1: Photon radiation.*

38. **NAISMITH O.F.** and SIEBERT B.R.L., *A Database of Neutron Spectra, Instrument Response Functions, and Dosimetric Conversion Factors for Radiation Protection Applications, Radiat. Prot. Dosim.*, **70**, No. 1/4 (1996).

Приложение 1 (справочное). Методика проведения индивидуального дозиметрического контроля внешнего облучения персонала

П1.1. Область применения

Настоящее приложение распространяется на разработку методик измерений (МИ) при проведении индивидуального дозиметрического контроля в контролируемых условиях применения источников ИИ.

П1.2. Основные понятия

В рамках настоящей рекомендации используются следующие основные понятия:

Измерение	-	Совокупность операций, имеющих целью определение значения величины (*Международный словарь основных и общих терминов метрологии –VIM*). - Совокупность операций по применению технического средства, хранящего единицу физической величины, обеспечивающих нахождение соотношения (в явном или неявном виде) измеряемой величины с ее единицей и получение значения этой величины (*РМГ 29-99*). - Нахождение значения физической величины опытным путем с помощью специальных технических средств (*ГОСТ 16263-70*).
Основная величина	-	Физическая величина, входящая в систему величин и условно принятая в качестве независимой от других величин этой системы.
Производная величина	-	Физическая величина, входящая в систему величин и определяемая через основные величины.
Эталон единицы физической величины (эталон)	-	Средство измерений (или комплекс средств измерений), предназначенное для воспроизведения и (или) хранения единицы и передачи ее размера нижестоящим по поверочной схеме средствам измерений, и утвержденное в качестве эталона в установленном порядке.
Воспроизведение производной единицы	-	Определение значения физической величины в указанных единицах на основании измерений других величин, функционально связанных с измеряемой величиной.
Средство измерений	-	Техническое средство, предназначенное для измерений, имеющее нормированные метрологические характеристики, воспроизводящее и (или) хранящее единицу физической величины, размер которой принимают неизменным (в пределах установленной погрешности) в течение известного интервала времени.
Прямое измерение	-	Измерение, при котором искомое значение физической величины получают непосредственно.

Косвенное измерение	-	Определение искомого значения физической величины на основании результатов прямых измерений других физических величин, функционально связанных с искомой величиной.
Наблюдение при измерении	-	Экспериментальная операция, выполняемая в процессе измерений, в результате которой получают одно значение из группы значений величины, подлежащих совместной обработке для получения результата измерения.
Результат наблюдения	-	Значение величины, получаемое при отдельном наблюдении.
Результат измерения	-	Значение, приписываемое измеряемой величине, полученное путем измерения.
Погрешность результата измерения	-	Отклонение результата измерения от истинного (действительного) значения конкретной величины.
Нормальные условия	-	Условия измерения, характеризуемые совокупностью значений или областей значений влияющих величин, при которых изменением результата измерений пренебрегают вследствие малости.
Основная собственная погрешность средства измерений	-	Погрешность средства измерений, используемого в нормальных условиях
Влияющая величина	-	Величина, которая не является предметом измерения, но влияющая на результат измерения.
Дополнительная погрешность средства измерений	-	Составляющая погрешности средства измерений, возникающая дополнительно к основной погрешности вследствие отклонения какой-либо из влияющих величин от нормального ее значения или вследствие ее выхода за пределы нормальной области значений.
Критическая техническая характеристика средства измерений	-	Техническая характеристика средства измерений, для которой существует заметная вероятность количественного или качественного изменения в течение межповерочного интервала, и эти изменения могут привести к существенным изменениям метрологических характеристик средства измерений.
Неопределенность результата измерений	-	Параметр, связанный с результатом измерений и характеризующий рассеяние значений, которые можно приписать измеряемой величине.

Стандартная неопределенность - Неопределенность результата измерения, выраженная в виде среднего квадратического отклонения (равного положительному квадратному корню дисперсии).
Примечание. Используются два типа оценки стандартной неопределенности:
- оценка по типу А – используется метод оценивания неопределенности путем статистического анализа рядов наблюдений;
- оценка по типу В – используются методы оценивания неопределенности иными способами, чем статистический анализ рядов наблюдений.

Суммарная стандартная неопределенность - Величина, равная положительному квадратному корню суммы дисперсий неопределенностей, оцененных по типу А и по типу В.

Коэффициент охвата - Безразмерный коэффициент, используемый как множитель суммарной стандартной неопределенности для получения расширенной неопределенности.

Расширенная неопределенность - Величина, определяющая интервал вокруг результата измерения, в пределах которого, можно ожидать, находится большая часть распределения значений, которые с достаточным основанием могли быть приписаны измеряемой величине.

Операционная величина - Величина, однозначно определяемая через физические характеристики поля излучения в точке, максимально возможно приближенная в стандартных условиях облучения к величине, нормируемой в целях ограничения облучения, и предназначенная для консервативной оценки этой величины при дозиметрическом контроле.

Нормируемая величина - Величина, являющаяся мерой ущерба (вреда) от воздействия ионизирующего излучения на человека и его потомков.

Индивидуальный эквивалент дозы $H_p(d)$ - Эквивалент дозы в мягкой биологической ткани на глубине d мм под рассматриваемой точкой на теле. Величина d принимается равной 0,07 мм при облучении кожи, 3 мм при облучении хрусталика глаза и 10 мм при облучении всего тела и нижней части области живота женщины.
Единица индивидуального эквивалента дозы – Дж/кг; наименование – зиверт (Зв).
Относится к операционным величинам.

Эквивалентная доза в органе или ткани (эквивалентная доза) $H_{T,R}$ - Поглощенная доза в органе или ткани, умноженная на соответствующий взвешивающий коэффициент для определенного вида излучения W_R:

$$H_{T,R} = W_R \cdot D_{T,R},$$

где $D_{T,R}$ – средняя поглощенная доза в органе или ткани T.
Единица $H_{T,R}$ – Дж/кг, наименование – зиверт (Зв).
Относится к нормируемым величинам.

Эффективная доза для определенного вида излучения $H_{E,R}$ - Сумма произведений эквивалентной дозы в органах и тканях для определенного вида излучения на соответствующие взвешивающие коэффициенты W_T:

$$H_{E,R} = \sum_T (H_{T,R} \cdot W_T)$$

относится к нормируемым величинам.

Индивидуальный дозиметрический контроль (ИДК) - Контроль облучения персонала, заключающийся в определении индивидуальной дозы облучения работника на основании результатов индивидуальных измерений характеристик облучения тела или отдельных органов каждого работника, либо индивидуального поступления радионуклидов в организм каждого работника.

П1.3. Основные положения

П1.3.1. Целью разработки МИ при проведении ИДК должно быть установление процедуры получения результатов измерений нормируемых величин с учетом их неопределенности, гарантирующих не превышение допустимых дозовых пределов в соответствии с НРБ-99/2009.

П1.3.2. Целесообразно разделить МИ на два уровня: типовые МИ и МИ для конкретных предприятий.

П1.3.2.1.Типовые МИ должны содержать общие принципы и особенности использования отдельных типов средств измерений (ТЛД для гамма-излучения, ТЛД для смешанного излучения, ТЛД для нейтронного излучения, радиофотолюминесцентные дозиметры, нейтронные дозиметры на основе активационных детекторов и делящихся детекторов, конденсаторные дозиметры, прямопоказывающие электронные гамма-нейтронные дозиметры и т. п.) для прямых и косвенных измерений операционных и нормируемых величин.

П1.3.2.1.1. Типовые МИ должны содержать анализ основных влияющих величин и экспериментальные и теоретические методы оценки поправок для различных влияющих факторов, методы оценки неопределенности результатов измерений нормируемых величин.

П1.3.2.1.2. Типовые МИ должны содержать рекомендации о целесообразности разработки МИ для конкретных предприятий.

П1.3.2.1.3. Типовые МИ должны использоваться при разработке МИ для конкретных предприятий.

П1.3.2.2. Разработке МИ для конкретного предприятия должно предшествовать обоснование необходимости или целесообразности ее разработки, включающее в себя:

– анализ условий облучения отдельных групп персонала;

– прогноз верхних пределов значений эффективной дозы при внешнем и внутреннем облучении для каждой группы персонала;

– прогноз верхних пределов значений эквивалентной дозы при внешнем облучении для каждой группы персонала;

– наличие соответствующих средств измерений (СИ), допустимых для использования в сфере государственного метрологического контроля и надзора;

– организация поверки СИ (с возможным изменением межповерочного интервала в сторону уменьшения);

– порядок контроля критических технических характеристик СИ в период межповерочного интервала;

– наличие технических средств для проведения такого контроля.

Если в результате анализа условий облучения установлено, что значения нормируемых величин, включая внутреннее и внешнее облучение, не превышает половины установленных дозовых пределов, то разработка МИ нецелесообразна.

МИ для конкретного предприятия должны содержать численные значения поправок для учета вклада в результат измерения влияющих величин, которые обоснованно следует учитывать для данных средств измерений, и оцененные значения неопределенностей результатов измерений для отдельных групп персонала с учетом условий облучения.

МИ для конкретного предприятия должны содержать обязательное Приложение, устанавливающее порядок (регламент) ее применения на предприятии, включающий в себя:

– указание ответственных служб и лиц за проведение измерений;

– правила внесения поправок в результат измерения и оценки неопределенности результата измерения;

– запись результатов измерений и их неопределенностей;

– способы хранения результатов измерений и их использование в общей, в том числе, автоматизированной системе ИДК.

П1.4. Содержание и изложение МИ

П1.4.1. Типовые МИ должны включать в себя следующие основные разделы:

– Вводная часть (Основные положения);

– Основные методы измерений;

– Допустимые средства измерений;

– Условия измерений;

– Перечень возможных влияющих величин при выполнении измерений;

– Методы и средства контроля критических технических характеристик используемых средств измерений;

– Подготовка к выполнению измерений;

– Выполнение измерений;

– Обработка результатов измерений;

– Оценка соответствия результатов измерений требованиям ИДК.

Допускается объединение отдельных разделов и исключение некоторых разделов со ссылкой на другие НТД.

П1.4.1.1. В разделе «Вводная часть» устанавливаются назначение и область применения данной МИ и приводится обоснование цели и необходимости применения МИ.

П1.4.1.2. В разделе «Основные методы измерений» рассматриваются основные методы измерений нормируемой величины и приводятся их сравнительные характеристики.

П1.4.1.3. В разделе «Допустимые средства измерений» устанавливается возможность использования средств измерений, исходя из их технических характеристик, включая значения основной и дополнительных погрешностей средств измерений.

В этом разделе должно быть обязательное указание, что все средства измерений, используемые для целей ИДК, должны быть занесены в Государственный реестр средств измерений и иметь действующие свидетельства о поверке.

П1.4.1.4. В разделе «Условия измерений» рассматриваются условия реальных измерений и возможные их отличия от нормальных условий.

П1.4.1.5. В разделе «Перечень возможных влияющих величин при выполнении измерений» должны рассматриваться влияющие факторы при измерении операционных и нормируемых величин в зависимости от методов измерений и класса дозиметров, проводиться их анализ и оценка их влияния на результат измерений, а также возможность исключения их из рассмотрения из-за малости влияния на результат измерений.

Перечень основных влияющих факторов для различных типов средств измерений приведен в **Дополнении А** к Приложению 1 настоящих МУ.

П1.4.1.6. В разделе «Методы и средства контроля критических технических характеристик используемых средств измерений» рассматриваются технические характеристики, которые могут измениться в процессе эксплуатации за счет изменений свойств детекторов и отдельных узлов блоков детектирования средств измерений, приводящих к изменению метрологических характеристик, а также периодичность, средства и методы для контроля этих изменений в течение межповерочного интервала.

П1.4.1.7. В разделе «Подготовка к выполнению измерений» дается ссылка на раздел руководства по эксплуатации, касающийся подготовки средства измерений к проведению измерений, а также рекомендуются необходимые дополнительные специальные процедуры, учитывающие реальные условия эксплуатации средств измерений, в том числе их размещение в определенных местах на теле.

П1.4.1.8. В разделе «Выполнение измерений» дается ссылка на раздел руководства эксплуатации, касающийся выполнения измерений, а также рекомендуются процедуры и периодичность считывания показаний в зависимости от типа используемых средств измерений, процедуры контроля изменения влияющих факторов, приводящие к уменьшению неопределенности результата измерений.

П1.4.1.9. В разделе «Обработка результатов измерений» должны рассматриваться общие принципы обработки результата измерений для отдельной нормируемой величины и оценки его неопределенности для каждого выбранного метода косвенных измерений и соответствующего ему средства измерений.

Основы методов обработки результатов измерений приведены в **Дополнении Б** к Приложению 1 настоящих МУ.

Основы методов оценки неопределенности результатов измерений приведены в **Дополнении В** к Приложению 1 настоящих МУ.

П1.4.1.10. В разделе «Оценка соответствия результатов измерений требованиям ИДК» должен быть порядок интерпретации результатов ИДК с учетом внешнего и внутреннего облучения и смешанных полей излучения.

Порядок оценки соответствия результатов ИДК установленным нормативам изложен в **Дополнении Г** к Приложению 1 настоящих МУ.

П1.4.2. МИ для конкретных предприятий должны содержать следующие основные разделы:

- Вводная часть (Основные положения);
- Метод измерений;
- Средства измерений;
- Условия измерений;
- Требования к неопределенности результатов измерений;
- Анализ влияющих величин;
- Методы и средства контроля критических технических характеристик используемых средств измерений в процессе эксплуатации;
- Требования безопасности;
- Квалификационные требования;
- Подготовка к выполнению измерений;
- Выполнение измерений;

– Обработка результатов измерений;

– Оценивание результатов ИДК.

Допускается объединение отдельных разделов и исключение некоторых разделов со ссылкой на другие НТД.

П1.4.2.1. В разделе «Вводная часть» устанавливаются назначение и область применения данной МИ.

П1.4.2.2. В разделе «Методы измерений» рассматриваются конкретные, предназначенные для данного предприятия методы измерений требуемых нормируемых величин.

П1.4.2.3. В разделе «Средства измерений» устанавливается возможность использования средств измерений, исходя из их технических и метрологических характеристик, включая значения основной и дополнительных погрешностей средств измерений.

В этом разделе должно быть обязательное указание, что все средства измерений, используемые для целей ИДК, должны быть занесены в Государственный реестр средств измерений и иметь действующие свидетельства о поверке.

П1.4.2.4. В разделе «Условия измерений» рассматриваются условия реальных измерений и их отличие от нормальных условий для каждого конкретного помещения или рабочего места.

П1.4.2.5. В разделе «Требования к неопределенности результатов измерений» рассматриваются требования к неопределенности результатов измерений с учетом требований к неопределенности нормируемых величин.

П1.4.2.6. В разделе «Анализ влияющих величин» устанавливаются значения поправочных коэффициентов и значения их неопределенности, а также, какими влияющими факторами можно пренебречь для конкретных помещений и рабочих мест.

П1.4.2.7. В разделе «Методы и средства контроля критических технических характеристик используемых средств измерений в процессе эксплуатации» рассматриваются технические характеристики средств измерений, которые могут измениться в процессе эксплуатации за счет изменений свойств детекторов и отдельных узлов блоков детектирования средств измерений, приводящих к изменению метрологических характеристик, используемых на предприятии для целей ИДК, а также периодичность, средства и методы для контроля этих изменений в течение межповерочного интервала.

П1.4.2.8. В разделе «Требования безопасности» указывается на необходимость соблюдения требований НРБ-99/2009, ОСПОРБ-99/2010, требований НТД на используемые средства измерений и специальные инструкции, действующие на предприятии.

П1.4.2.9. В разделе «Квалификационные требования» устанавливаются требования к квалификации и опыту работы персонала, исходя из применяемых средств измерений и процедуры обработки результатов измерений. Устанавливается перечень НТД, необходимый для ознакомления и усвоения при проведении работ по ИДК.

П1.4.2.10. В разделе «Подготовка к выполнению измерений» дается ссылка на раздел руководства по эксплуатации, касающийся подготовки средства измерений к проведению измерений, а также рекомендуются необходимые дополнительные специальные процедуры, учитывающие реальные условия эксплуатации средств измерений, в том числе, их размещение в определенных местах на теле.

П1.4.2.11. В разделе «Выполнение измерений» дается ссылка на раздел руководства эксплуатации, касающийся выполнения измерений, даются рекомендации по размещению дозиметра на теле, а также рекомендуются процедуры и периодичность считывания показаний в зависимости от типа используемых средств измерений, процедуры контроля изменения влияющих факторов, приводящие к уменьшению неопределенности результата измерений.

П1.4.2.12. В разделе «Обработка результатов измерений» должен рассматриваться метод обработки результата измерений для нормируемой величины и оценки его нео-

пределенности для конкретного используемого метода косвенных измерений и соответствующего ему средства измерений. При этом следует руководствоваться **Дополнениями Б и В** к Приложению 1 настоящих МУ или использовать методы, рекомендованные соответствующей типовой МИ.

Важно установить, каким условиям облучения соответствует полученное значение нормируемой величины (передне-заднее, изотропное, ротационное и т. д.).

П1.4.1.13. В разделе «Оценивание результатов ИДК» должны устанавливаться принципы нормирования с учетом конкретных условий облучения. При этом следует руководствоваться **Дополнением Г** к Приложению 1 настоящих МУ или рекомендациями соответствующей типовой МИ.

Дополнение А (справочное) к Приложению 1
Основные влияющие факторы для отдельных классов дозиметров, в основе которых используются определенные методы измерений

В Таблице П1.1 знаком «+» отмечены влияющие факторы (величины), которые следует рассматривать при использовании дозиметров, относящихся к тому или иному классу.

Таблица П1.1 *- влияющие факторы (величины) для отдельных классов дозиметров*

№ п/п	Влияющие факторы (величины)	Типы (классы) дозиметров			
		Термолюминесцентные, фотолюминесцентные, фотопленочные	Трековые	Дозиметры с ионизационной камерой (конденсаторные)	Электронные
1	Диапазон, линейность (постоянство чувствительности по диапазону)	+	+	+	+
2	Собственный фон	+	+	+	+
3	Энергетическая зависимость чувствительности	+	+	+	+
4	Чувствительность к сопутствующим излучениям	+	+	+	+
5	Анизотропия чувствительности	+	+	+	+
6	Зависимость от мощности дозы	-	-	+	+
7	Стабильность чувствительности	+	-	+	+
8	Сохранность накопленной информации (дозы)	+	+	+	-
9	Воздействие света	+	-	-	-
10	Ударное воздействие	-	-	-	+
11	Температура окружающей среды	+	-	-	+
12	Повышенная влажность	+	-	+	-

№ п/п	Влияющие факторы (величины)	Типы (классы) дозиметров			
		Термолюминесцентные, фотолюминесцентные, фотопленочные	Трековые	Дозиметры с ионизационной камерой (конденсаторные)	Электронные
13	Атмосферное давление	-	-	+	-
14	Электромагнитные поля	-	-	-	+
15	Электрический разряд (электростатические пробои)	-	-	-	+
16	Положение дозиметра на теле	+	+	+	+

Дополнение Б (информационное) к Приложению 1
Основы методов обработки результатов измерений

Уравнение для косвенных измерений нормируемой величины в общем виде можно записать как

$$H_N = \prod_i F_i(\alpha_i) \cdot \prod_j K_j(\alpha_j) \cdot m_o \cdot P_o, \qquad (Б1)$$

где:

H_N – значение нормируемой величины (эффективная доза, эквивалентная доза в органе или ткани);

P_o – значение величины (число импульсов, заряд, световыход, число треков, наведенная активность и т. д.), получаемое при прямых измерениях в нормальных условиях, при этом это значение может быть результатом одного наблюдения или средним значением, полученным в многократных наблюдениях;

m_o – коэффициент, получаемый при градуировке (поверке) в нормальных условиях (коэффициент перехода к операционной величине в нормальных условиях), размерность которого зависит от размерности измеряемой величины P_o;

$K_j(\alpha_j)$ – усредненное значение поправочного коэффициента за счет изменения j-й влияющей величины (влияющего фактора) в определенном диапазоне в реальных условиях измерения при переходе к операционной величине, где α_j – j-я влияющая величина (параметр), характеризующая реальные условия измерения (температура, энергетический спектр излучения, пространственное распределение излучения, влажность, уровень электромагнитного излучения и т. д.);

$F_i(\alpha_i)$ – усредненное значение поправочного коэффициента за счет изменения i-й влияющей величины (влияющего фактора) в определенном диапазоне в реальных условиях облучения при переходе от операционной величины к нормируемой величине, где α_i – i-я влияющая величина (параметр), характеризующая реальные условия облучения (энергетический спектр излучения, пространственное распределение излучения).

Необходимо отметить, что некоторые поправочные коэффициенты $F_{NHi}(\alpha_i)$ и $K_{PHj}(\alpha_j)$ связаны с одними и теми же влияющими факторами, например, энергетический спектр излучения и пространственное распределение излучения, но эти коэффициенты разные по существу и могут значительно различаться по численному значению.

В тех случаях, когда градуировочный коэффициент m_o устанавливается с помощью программных средств или электронных модулей, встроенных в средство измерений, и

средство измерений проградуировано в единицах операционных величин, уравнение для косвенных измерений нормируемой величины в общем виде можно записать как

$$H_N = \prod_i F_i(\alpha_i) \cdot \prod_j K_j(\alpha_j) \cdot H_{po}(d), \quad (Б2)$$

где $H_{po}(d)$ – значение операционной величины, полученной методом прямых измерений в нормальных условиях.

Нормируемые величины – эквивалентная доза в коже и эквивалентная доза в хрусталике глаза – применяются только в случаях внешнего облучения, в то время как нормируемая величина – эффективная доза – используется и при внутреннем облучении, и при внешнем облучении. Поэтому для эффективной дозы можно записать:

$$H_E = H_{Евнутр} + H_{Евнешн}, \quad (Б3)$$

При внешнем облучении в смешанных полях различных видов излучений (гамма-излучение, нейтронное излучение, бета-излучение) значение нормируемой величины представляет собой сумму значений нормируемой величины от различных видов излучений:

$$H_N = H_{Ng} + H_{Nn} + H_{N\beta}, \quad (Б4)$$

где H_{Ng}, H_{Nn}, $H_{N\beta}$ – значение нормируемой величины для гамма-излучения, нейтронного излучения, бета-излучения, соответственно.

При этом значения нормируемой величины в выражении (Б4) могут быть получены в различных вариантах:

– каждое значение получено с помощью отдельного средства измерений;

– некоторые значения получены с помощью одного средства измерений по различным каналам регистрации;

– некоторые значения получены с помощью одного средства измерений как сумма отдельных значений.

В отсутствие источников бета-излучения измерение эквивалентной дозы фотонного излучения, если энергия фотонов превышает 20 кэВ, не является актуальной для эквивалентной дозы в хрусталике глаза и, если энергия фотонов превышает 10 кэВ, для эквивалентной дозы в коже, т. к. в этих случаях значения допустимых пределов эквивалентной дозы не будут превышены, если не превышен допустимый предел эффективной дозы.

В МИ для конкретных предприятий должен быть проведен тщательный анализ полей излучений, в которых происходит облучение, и должен быть обоснован выбор средств измерений.

В типовых МИ должны быть приведены теоретические и (или) экспериментальные методы определения зависимости коэффициентов от влияющих величин, диапазон их изменения или их значения для определенных распределений влияющих величин, а также перечень влияющих величин, которыми можно пренебречь из-за малости их влияния на результат измерения.

Дополнение В (информационное) к Приложению 1
Основы методов оценки неопределенности результатов измерений

Оценка неопределенности результата измерений может оказаться сложной задачей, требующей тщательного анализа условий измерения и влияющих факторов, а также применения своего опыта, априорной информации, интуиции и т. д., поэтому разработка универсальной процедуры оценки не представляется возможной. Тем не менее, общие принципы оценки неопределенности разработаны и приведены в рекомендациях «Руководство по выражению неопределенностей измерений» (перевод аутентичен «GUIDE TO THE EXPESSION OF UNCERTAINTY IN MEASUREMENT»).

Приведенные ниже цитаты из Руководства отражают причины введения неопределенности результатов измерений и возникающие при этом трудности.

1. Хотя это Руководство *дает схему определения неопределенности, оно не может заменить критическое размышление, интеллектуальную честность и профессиональное мастерство. Оценка неопределенности не является ни рутинной работой, ни чисто математической; она зависит от детального знания природы измеряемой величины и измерения. Поэтому качество и ценность упомянутой неопределенности результата измерения в конечном счете зависит от критического анализа и честности тех, кто участвует в приписывании ее значения.*

2. Руководство дает скорее реалистическое, чем «безопасное» значение неопределенности, основанное на концепции о том, что не существует врожденных различий между составляющими неопределенности, возникающими из случайного эффекта и из поправки на систематический эффект. Поэтому данный метод находится в противоречии к определенным более старым методам, которые имели в общей основе две следующие идеи.

2.1. Первая идея заключается в том, что сообщаемая неопределенность должна быть «безопасной» или «консервативной», имея в виду, что она никогда не должна слишком занижаться. Действительно, поскольку оценивание неопределенности результата измерения проблематична, часто ее преднамеренно увеличивали.

2.2. Вторая идея заключается в том, что влияния, которые дает увеличение неопределенности, всегда принимались как или «случайные», или «систематические», будучи различной природы происхождения; неопределенности, связанные с каждым из них, должны были суммироваться своим способом и сообщаться отдельно друг от друга (или суммироваться определенным образом, если требовалось одно число). Фактически способ суммирования неопределенностей часто выбирался так, чтобы удовлетворить требованию безопасности.

3. Существует три явных преимущества толкования вероятности, базирующейся на степени доверия, стандартном отклонении (стандартной неопределенности) и законе распространения неопределенности, как основании для оценивания и выражения неопределенности измерения, как и было сделано в данном Руководстве:

а) закон распространения неопределенности позволяет легко ввести суммарную стандартную неопределенность одного результата в оценивание суммарной стандартной неопределенности другого результата, в котором используется первый результат;

б) суммарная стандартная неопределенность может служить основанием для вычисления интервалов, которые реально соответствуют их требуемым уровням доверия; и

в) при оценивании неопределенности нет необходимости классифицировать составляющие на «случайные» или «систематические» (или каким-либо другим образом), поскольку все составляющие неопределенности рассматриваются одним и тем же способом.

Преимущество в) *особенно привлекательно, поскольку подобная классификация часто является источником непонимания; составляющая неопределенности не является ни «случайной», ни «систематической». Ее природа определяется использованием соответствующей величины или, более формально, контекстом, в котором эта величина предстает в математической модели, которая описывает измерение. Таким образом, когда соответствующая ей величина используется в другом контексте, «случайная» составляющая может стать «систематической», и наоборот.*

4. Когда стандартную неопределенность входной величины нельзя оценить с помощью анализа результатов наблюдений, повторенных необходимое число раз, нужно применить распределение вероятностей, основанное на знании, которое гораздо скуднее желаемого. Однако это не делает распределение непригодным или нереальным; как и все распределения вероятностей, оно является выражением того знания, которое существует.

Обычно уравнение измерений имеет вид:

$$y = f(x_1, x_2, ..., x_n). \quad \text{(В1)}$$

Следуя закону о распространении неопределенности, можно записать выражение для дисперсии y как:

$$\sigma_y^2 = \sum_{i=1}^{n}\left(\frac{\partial f}{\partial x_i}\right)^2 \cdot \sigma_i^2 + 2 \cdot \sum_{i=1}^{n-1}\sum_{j=i+1}^{n} \frac{\partial f}{\partial x_i} \cdot \frac{\partial f}{\partial x_j} \sigma_i \cdot \sigma_j \cdot \rho_{ij}, \quad \text{(В2)}$$

где σ_i, σ_j – дисперсии x_i и x_j соответственно; ρ_{ij} – коэффициент корреляции x_i и x_j.

Для независимых входных величин x_i (отсутствует корреляция между входными величинами) выражение для дисперсии будет иметь вид:

$$\sigma_y^2 = \sum_{i=1}^{n}\left(\frac{\partial f}{\partial x_i}\right)^2 \cdot \sigma_i^2, \quad \text{(В3)}$$

а относительная стандартная неопределенность определяется как:

$$u_{cy} = \frac{1}{y}\sqrt{\sigma_y^2}. \quad \text{(В4)}$$

Относительная суммарная стандартная неопределенность результата измерений нормируемой величины, полученного в косвенных измерениях в соответствии с уравнением (Б1), можно рассчитать согласно выражения:

$$u_{cH} = \frac{1}{H_N} \cdot \left(\sum_i (F_i^2 \cdot u_{F_i}^2) + \sum_j (K_j^2 \cdot u_{K_j}^2) + \frac{1}{3} \cdot m^2 \cdot \Delta_m^2 + P_o^2 \cdot \sigma_p^2 \right)^{1/2}, \quad \text{(В5)}$$

где $u_{F_i}^2$ и $u_{K_j}^2$ – относительные дисперсии коэффициентов $F_i(\alpha_i)$ и $K_j(\alpha_j)$ соответственно; Δ_m – предел погрешности градуировочного коэффициента m_o; σ_p – относительное среднее квадратическое отклонение результата наблюдения (или относительное среднее квадратическое отклонение результата измерения), метод определения которого должен приводиться в типовой МИ и МИ для конкретного предприятия.

При равновероятном распределении значений коэффициентов $F_i(\alpha_i)$ и $K_j(\alpha_j)$ в определенных интервалах дисперсии $u_{F_i}^2$ и $u_{K_j}^2$ будут равны 1/3 квадрата половины соответствующего относительного интервала, тогда выражение (В5) можно представить в виде:

$$u_{cH} = \frac{1}{H_N} \cdot \left(\frac{1}{3} \cdot \left(\sum_i (F_i^2 \cdot U_{F_i}^2) + \sum_j (K_j^2 \cdot U_{K_j}^2) + m^2 \cdot \Delta_m^2 \right) + P_o^2 \cdot \sigma_p^2 \right)^{1/2}, \quad \text{(В6)}$$

В случаях, когда результат измерения получают при однократном наблюдении с использованием уравнения (Б2), относительная стандартная неопределенность определяется согласно выражения:

$$u_{cH} = \frac{1}{H_N} \cdot \left(\frac{1}{3} \cdot \left(\sum_i (F_i^2 \cdot U_{F_i}^2) + \sum_j (K_j^2 \cdot U_{K_j}^2) + H_p^2 \cdot \Delta_{H_p}^2 \right) \right)^{1/2}, \quad \text{(В7)}$$

где Δ_{H_p} – пределы относительной погрешности средства измерений при измерении в нормальных условиях.

Расширенная относительная неопределенность определяется как:

$$U_H = K \cdot u_{cH}, \quad \text{(В8)}$$

где K – коэффициент охвата.

Следует отметить, что умножение u_{cH} на какую-либо постоянную величину не дает никакой новой информации, а просто представляет ранее имевшуюся информацию в новом виде. По этой причине, если приводится значение расширенной неопределенности, **обязательно должно быть приведено значение коэффициента охвата**, так как при

оценке уровня доверия используется имеющаяся на данный момент информация, которая в последствии может уточняться и добавляться, и ее использование может привести к другому уточненному соотношению между уровнем доверия и значением коэффициента охвата.

На практике очень трудно указать уровень доверия для интервала, определяемого коэффициентом охвата, поскольку это требует полного знания распределения вероятностей, характеризуемого результатом измерения и его суммарной стандартной неопределенностью.

Однако в тех практических случаях, когда известны законы распределения вероятности, можно связать уровень доверия со значением коэффициента охвата. Например, в случае нормального закона распределения вероятности можно считать, что уровню доверия 0,95 соответствует значение коэффициента охвата 2, а уровню доверия 0,99 соответствует значение коэффициента охвата 3. В то же время для равномерного закона распределения можно считать, что уровню доверия 0,95 соответствует значение коэффициента охвата 1,65, а уровню доверия 0,99 соответствует значение коэффициента охвата 1,71.

Обычно значение K выбирают в интервале от 2 до 3.

Дополнение Г (справочное) к Приложению 1
Оценка соответствия результатов ИДК установленным нормативам

Оценка соответствия результатов ИДК установленным нормативам осуществляется для нормативов по эффективной дозе и для нормативов по эквивалентной дозе на отдельные органы. Суммарную эффективную дозу можно представить как сумму эффективных доз, полученных при внутреннем и внешнем облучении:

$$H_{E\,сумма} = H_{E\,внешн} + H_{E\,внутр}. \qquad (Г1)$$

При этом эффективную дозу при внешнем облучении можно представить как сумму эффективной дозы гамма-, нейтронного и бета-излучений:

$$H_{E\,внешн} = H_{E\,внешн,\gamma} + H_{E\,внешн,n} + H_{E\,внешн,\beta}. \qquad (Г2)$$

При этом, если максимальная граница энергии бета-излучения не превышает 2,2 МэВ, можно считать $H_{Eвнешн,\beta} = 0$ (нормирование в этом случае для бета-излучения осуществляется по эквивалентной дозе в коже и хрусталике глаза).

При условии независимости составляющих неопределенностей относительная суммарная стандартная неопределенность или относительная суммарная расширенная неопределенность (если составляющие неопределенности даны с одинаковым коэффициентом охвата) рассчитывается как:

$$u_H = \frac{1}{H_{E\Sigma}} \cdot \sqrt{H^2_{E\,внешн,\gamma} \cdot u^2_{внешн,\gamma} + H^2_{E\,внешн,n} \cdot u^2_{внешн,n} + H^2_{E\,внутр} \cdot u^2_{внутр}}. \qquad (Г3)$$

Верхняя граница интервала, в котором должно находиться значение $H_{E\Sigma}$, определяется как:

$$E_{E\Sigma} + U^+_H = H_{E\Sigma} \cdot (1 + u^+_H). \qquad (Г4)$$

При этом u^+_H определяется по формуле:

$$u^+_H = \frac{u_H}{1 - u_H}. \qquad (Г5)$$

Исходя из принципа нормирования и безусловно приемлемой неопределенности, должно выполняться неравенство:

$$H_{E\Sigma}(1 + u^+_H) / 20 \le \alpha_в. \qquad (Г6)$$

Отсюда следует, что результаты ИДК можно считать приемлемыми, если

$$H_{E\Sigma} \le 20 \text{ и } \frac{u_H^+ \cdot H_{E\Sigma}}{20} \le \alpha_в - 1, \quad (Г7)$$

где $\alpha_в$ – безусловно приемлемая неопределенность, усредненная с учетом вклада в суммарную эффективную дозу отдельных составляющих.

$$\alpha_в = (1{,}5 \cdot H_{E\,внешн,\,g} + 2{,}0 \cdot H_{E\,внешн,\,n} + 2{,}5 \cdot H_{E\,внутр}) / H_{E\Sigma}. \quad (Г8)$$

Если всегда выполняется неравенство

$$H_{E\Sigma}(1 + u_H^+) / 20 < 1, \quad (Г9)$$

то допустимый дозовый предел никогда не будет превышен, и должна быть обоснована целесообразность разработки МИ.

При установленной квоте на внутреннее облучение результаты ИДК при внешнем облучении можно считать приемлемыми, если

$$H_{E\,внешн} \le (20 - H_{E\,внутр}(1 + u_{внутр}^+)) \text{ и } \frac{u_H^+ \cdot H_{E\,внешн}}{(20 - H_{E\,внутр}(1 + u_{внутр}^+))} \le \alpha_в - 1, \quad (Г10)$$

где u_H^+ рассчитывается по формуле (Г5), но u_H при этом рассчитывается по формуле:

$$u_H = \frac{1}{H_{E\Sigma}} \sqrt{H_{E\,внешн,g}^2 \cdot u_{внешн,g}^2 + H_{E\,внешн,n}^2 \cdot u_{внешн,n}^2}, \quad (Г11)$$

$$\alpha_в = (1{,}5 \cdot H_{E\,внешн,\,g} + 2{,}0 \cdot H_{E\,внешн,\,n}) / H_{E\,внешн}. \quad (Г12)$$

Приложение 2 (справочное)
Методика определения эффективной дозы нейтронного излучения путем измерения индивидуального эквивалента дозы термолюминесцентными дозиметрами

П2.1 Назначение МИ

П2.1.1 Настоящая методика (далее по тексту МИ) предназначена для определения значений эффективной дозы при измерении индивидуального эквивалента дозы с помощью индивидуальных термолюминесцентных дозиметров при проведении индивидуального дозиметрического контроля (ИДК) персонала.

П2.1.2 МИ устанавливает процедуру перехода от показаний индивидуальных термолюминесцентных дозиметров к величине эффективной дозы, определяет требования к точности измерений, учету влияющих факторов и процедуру оценки погрешности.

П2.1.3 МИ разработана с учетом требований следующих документов:

– ГОСТ Р 8.594-2002 Государственная система обеспечения единства измерений. Метрологическое обеспечение Радиационного контроля. Основные положения.

– ГОСТ Р 8.563-96 Государственная система обеспечения единства измерений. Методики выполнения измерений.

– ГОСТ Р ИСО 9000-2008 Системы менеджмента качества. Основные положения и словарь.

– ГОСТ Р ИСО 5725-2002 Точность (правильность и прецизионность) методов и результатов измерений.

– МУ 2.6.5.026-2016 Дозиметрический контроль внешнего профессионального облучения. Общие требования.

П2.2. Основные понятия

П2.2.1. В рамках настоящей МИ используются следующие основные понятия:

Средство измерений	-	Техническое средство, предназначенное для измерений, имеющее нормированные метрологические характеристики, воспроизводящее и (или) хранящее единицу физической величины, размер которой принимают неизменным (в пределах установленной погрешности) в течение известного интервала времени.
Прямое измерение	-	Измерение, при котором искомое значение физической величины получают непосредственно.
Косвенное измерение	-	Определение искомого значения физической величины на основании результатов прямых измерений других физических величин, функционально связанных с искомой величиной.
Наблюдение при измерении	-	Экспериментальная операция, выполняемая в процессе измерений, в результате которой получают одно значение из группы значений величины, подлежащих совместной обработке для получения результата измерения.
Результат наблюдения	-	Значение величины, получаемое при отдельном наблюдении.
Результат измерения	-	Значение, приписываемое измеряемой величине, полученое путем измерения.

Погрешность результата измерения	-	Отклонение результата измерения от истинного (действительного) значения конкретной величины.
Нормальные условия	-	Условия измерения, характеризуемые совокупностью значений или областей значений влияющих величин, при которых изменением результата измерений пренебрегают вследствие малости.
Основная погрешность средства измерений	-	Погрешность средства измерений, используемого в нормальных условиях.
Влияющая величина	-	Величина, которая не является предметом измерения, но влияет на результат измерения.
Дополнительная погрешность средства измерений	-	Составляющая погрешности средства измерений, возникающая дополнительно к основной погрешности вследствие отклонения какой-либо из влияющих величин от нормального ее значения или вследствие ее выхода за пределы нормальной области значений.
Партия дозиметров (детекторов)	-	Группа дозиметров (детекторов), изготовленных по одной и той же технической документации и имеющих одинаковые характеристики, соответствующие определенным техническим требованиям.
Однородность партии	-	Отличие между максимальным и минимальным значением результата наблюдения, полученных для всех дозиметров (детекторов) из партии при определенном значении дозы.
Критическая техническая характеристика средства измерений	-	Техническая характеристика средства измерений, для которой существует заметная вероятность количественного или качественного изменения в течение межповерочного интервала, и эти изменения могут привести к существенным изменениям метрологических характеристик средства измерений.
Неопределенность результата измерений	-	Параметр, связанный с результатом измерений и характеризующий рассеяние значений, которые можно приписать измеряемой величине.
Стандартная неопределенность	-	Неопределенность результата измерения, выраженная в виде среднего квадратического отклонения (равного положительному квадратному корню дисперсии). *Примечание. Используются два типа оценки стандартной неопределенности:* *– оценка по типу А – используется метод оценивания неопределенности путем статистического анализа рядов наблюдений;* *– оценка по типу В – используются методы оценивания неопределенности иными способами, чем статистический анализ рядов наблюдений.*
Суммарная стандартная неопределенность	-	Величина, равная положительному квадратному корню суммы дисперсий неопределенностей, оцененных по типу А и по типу В.

Коэффициент охвата - Безразмерный коэффициент, используемый как множитель суммарной стандартной неопределенности для получения расширенной неопределенности.

Расширенная неопределенность - Величина, определяющая интервал вокруг результата измерения, в пределах которого, можно ожидать, находится большая часть распределения значений, которые с достаточным основанием могли быть приписаны измеряемой величине.

Операционная величина - Величина, однозначно определяемая через физические характеристики поля излучения в точке, максимально возможно приближенная в стандартных условиях облучения к величине, нормируемой в целях ограничения облучения, и предназначенная для консервативной оценки этой величины при дозиметрическом контроле.

Нормируемая величина - Величина, являющаяся мерой ущерба (вреда) от воздействия ионизирующего излучения на человека и его потомков.

Индивидуальный эквивалент дозы $H_p(d)$ - Эквивалент дозы в мягкой биологической ткани на глубине d мм под рассматриваемой точкой на теле. Величина d принимается равной 0,07 мм при облучении кожи, 3 мм при облучении хрусталика глаза и 10 мм при облучении всего тела и нижней части области живота женщины.
Единица индивидуального эквивалента дозы – Дж/кг; наименование – зиверт (Зв).
Относится к операционным величинам.

Эквивалентная доза в органе или ткани (эквивалентная доза) H_T - Поглощенная доза в органе или ткани, умноженная на соответствующий взвешивающий коэффициент для определенного вида излучения W_R:

$$H_T = \sum_R (D_{T,R} \cdot W_R),$$

где $D_{T,R}$ – средняя поглощенная доза в органе или ткани T.
Единица H_T – Дж/кг, наименование – зиверт (Зв).
Относится к нормируемым величинам.

Эффективная доза для определенного вида излучения H_E - Сумма произведений эквивалентной дозы в органах и тканях для определенного вида излучения на соответствующие взвешивающие коэффициенты W_T:
$H_E = \sum_T (H_T \cdot W_T)$. Относится к нормируемым величинам.

Индивидуальный дозиметрический контроль (ИДК) - Контроль облучения персонала, заключающийся в определении индивидуальной дозы облучения работника на основании результатов индивидуальных измерений характеристик облучения тела или отдельных органов каждого работника, либо индивидуального поступления радионуклидов в организм каждого работника.

Запись - Документ, содержащий достигнутые результаты или свидетельства осуществленной деятельности.

Процедура - Установленный способ осуществления деятельности или процесса.

П2.3. Основные положения

П2.3.1. Целью разработки МИ является установление процедуры получения результатов измерений нормируемой величины – эффективной дозы с учетом ее неопределенности, гарантирующей не превышение допустимых дозовых пределов (ДДП) в соответствии с НРБ-99/2009 при хроническом облучении персонала нейтронным излучением, и минимальное значение неопределенности результата измерений в случаях планируемого превышения дозовых пределов.

П2. МИ не распространяется на ИДК при аварийном облучении и на ИДК с использованием методов дозиметрического контроля рабочих мест.

П2.3.2. МИ содержит особенности использования средств измерений (далее СИ) термолюминесцентных дозиметров (далее – дозиметров) для прямых измерений операционной величины – индивидуального эквивалента дозы (ИЭД) в условиях отличных от условий градуировки и поверки дозиметров.

П2.3.2.1. МИ содержит анализ основных влияющих величин и экспериментальные и теоретические методы оценки поправочных коэффициентов для различных влияющих факторов, методы оценки неопределенности результатов измерений нормируемой величины – эффективной дозы.

П2.3.3. Обоснование целесообразности использования МИ для конкретных условий облучения включает в себя:

– анализ условий облучения отдельных групп персонала;

– прогноз верхних пределов значений эффективной дозы при внешнем и внутреннем облучении для каждой группы персонала;

– наличие соответствующих СИ, допустимых для использования в сфере государственного метрологического контроля и надзора;

– организация поверки СИ (с возможным изменением межповерочного интервала в сторону уменьшения);

– контроль технических характеристик СИ в период межповерочного интервала и наличие технических средств для проведения такого контроля.

Если в результате анализа условий облучения установлено, что значения эффективной дозы нейтронного излучения не превышает 1/3 установленного дозового предела, то в формуле (1) величины всех поправочных коэффициентов принимаются равными 1.

П2.3.4. МИ должна утверждаться ответственным лицом предприятия, и при этом должен устанавливаться порядок (регламент) применения МИ, включающий в себя:

– указание ответственных служб и лиц за проведение измерений;

– правила внесения поправок в результат измерения индивидуального эквивалента дозы термолюминесцентным дозиметром с целью перехода к значениям эффективной дозы;

– запись результатов измерений и их неопределенностей;

– способы хранения результатов измерений и их использование в общей, в том числе, автоматизированной системе ИДК.

П2.4. Требования к неопределенности результатов измерений

Следует использовать допустимые относительные неопределенности оценки значений эффективной дозы при внешнем облучении персонала, которые приведены в Таблице П2.1.

***Таблица П2.1** - Допустимые относительные неопределенности оценки значений эффективной дозы при внешнем облучении персонала*

Вид излучения			Условия определения
Фотоны	Нейтроны	Электроны	
+50 % –30 %	+100 % –50 %	+100 % –50 %	На уровне допустимых пределов дозы
+100 % –50 %	+170 % –60 %	+170 % –60 %	На уровне 1/5 допустимых пределов дозы
+180 % –65 %	+270 % –70 %	+270 % –70 %	На уровне нижней границы диапазона измерения дозы

Если оцененное значение эффективной дозы больше значения ДДП, то неопределенность должна быть меньше.

П2.5. Косвенный метод измерения эффективной дозы термолюминесцентными дозиметрами

П2.5.1. Уравнение для косвенных измерений эффективной дозы нейтронного излучения в общем виде можно записать как:

$$H_{En} = \prod_i F_{Hi}(\alpha_i) \cdot \prod_j K_{Pj}(\alpha_j) \cdot H_{po}, \quad (1)$$

где:

H_{En} – значение эффективной дозы нейтронного излучения;

H_{po} – значение величины, получаемое при прямых измерениях в нормальных условиях (градуировка, поверка);

$K_{pj}(\alpha_j)$ – усредненное значение поправочного коэффициента за счет изменения *j*-й влияющей величины (влияющего фактора), характеризующей реальные условия измерения (температура, энергетический спектр излучения, пространственное распределение излучения, влажность и т. д.);

$F_{Hi}(\alpha_i)$ – усредненное значение поправочного коэффициента за счет изменения *i*-й влияющей величины (влияющего фактора) при переходе от индивидуального эквивалента дозы к эффективной дозе (энергетический спектр излучения, пространственное распределение излучения).

Примечание: Некоторые поправочные коэффициенты $F_{Hi}(\alpha_i)$ и $K_{Pj}(\alpha_j)$ связаны с одними и теми же влияющими факторами, а именно, энергетический спектр излучения и пространственное распределение излучения, но эти коэффициенты разные по существу и, хотя между коэффициентами возможна корреляция, неопределенности коэффициентов можно считать независимыми.

П2.5.2. Метод измерения индивидуального эквивалента дозы нейтронного излучения термолюминесцентным дозиметром основан на регистрации тепловых нейтронов, которые образуются при замедлении нейтронов, падающих на тело человека, и попадают на детектор, чувствительный к тепловым нейтронам (как правило, эти детекторы в своем составе имеют изотопы ^{6}Li или ^{10}B), размещенный на поверхности тела человека. Вклад от сопутствующего гамма-излучения определяется с помощью детекторов, чувствительностью которых к тепловым нейтронам можно пренебречь.

Далее метод рассматривается с применением детекторов ^{6}LiF и ^{7}LiF. Детектором, чувствительным к тепловым нейтронам, является термолюминесцентный детектор ^{6}LiF. Энергия в детекторе выделяется при поглощении теплового нейтрона в реакции ^{6}Li(n,α) ^{3}H. Для уменьшения влияния тепловых нейтронов, падающих на тело человека извне, детектор

^{6}LiF со стороны, обращенной от тела, должен закрываться экраном из кадмия или материала, содержащего ^{10}B. При использовании ^{10}B дозиметр может применяться для раздельного измерения нейтронов и гамма-излучения, а при использовании кадмия только для измерения нейтронного излучения из-за влияния на показания детектора гамма-излучения, возникающего при захвате тепловых нейтронов кадмием. Для учета вклада в показания детектора ^{6}LiF от гамма-излучения, присутствующего в поле смешанного гамма-нейтронного излучения, и гамма-излучения, образующегося в теле человека, в альбедном дозиметре используется детектор ^{7}LiF, нечувствительный к тепловым нейтронам. В общем случае значение индивидуального эквивалента дозы определяется при решении системы двух уравнений, составленных для детекторов различного типа:

$$N_1 = a_1 D_n + b_1 D_\gamma + c_1 D_f \text{ (для детектора } ^{6}\text{LiF)},$$
$$N_2 = a_2 D_n + b_2 D_\gamma + c_2 D_f \text{ (для детектора } ^{7}\text{LiF)}, \quad (2)$$

где:

N_1 и N_2 – отклик (показания, светосумма) детекторов ^{6}LiF и ^{7}LiF соответственно;

D_n, D_γ, D_f – энергия, выделяемая в детекторах ^{6}LiF и ^{7}LiF от тепловых нейтронов, гамма-излучения и нейтронов, падающих на детектор соответственно;

a_1 и a_2 – чувствительность детекторов ^{6}LiF и ^{7}LiF к тепловым нейтронам соответственно;

b_1 и b_2 – чувствительность детекторов ^{6}LiF и ^{7}LiF к гамма-излучению соответственно;

c_1 и c_2 – чувствительность детекторов ^{6}LiF и ^{7}LiF к нейтронам, падающим на детектор, соответственно.

Предполагая, что чувствительностью детектора ^{7}LiF к тепловым нейтронам можно пренебречь, а чувствительность детекторов ^{7}LiF и ^{6}LiF за счет упругого рассеяния нейтронов одинакова с учетом поправки на относительную чувствительность, систему уравнений (1) можно переписать в терминах индивидуального эквивалента дозы нейтронов и гамма-излучения следующим образом:

$$N_1 = H_{pn}/K_n + H_{p\gamma}/K_\gamma, \quad (3)$$

где:

H_{pn} и $H_{p\gamma}$ – индивидуальный эквивалент дозы нейтронного и гамма-излучения соответственно;

K_n и K_γ – градуировочные коэффициенты, полученные при поверке (градуировке) термолюминесцентных альбедных дозиметров по индивидуальному эквиваленту дозы раздельно в полях нейтронного и гамма-излучения соответственно.

П2.5.3. Значение индивидуального эквивалента дозы нейтронного излучения определяется при решении системы уравнений (3):

$$H_n = (N_1 - N_2) \cdot K_n. \quad (4)$$

П2.5.4. Основные факторы, влияющие на погрешность измерения индивидуального эквивалента дозы термолюминесцентными дозиметрами.

П2.5.4.1. Отличие условий облучения дозиметров при градуировке (поверке) от реальных условий при проведении измерений индивидуального эквивалента дозы.

П2.5.4.1.2. Отличие условий облучения дозиметров при градуировке (поверке) от реальных условий при проведении измерений индивидуального эквивалента дозы показано на Рисунках П2.1а и П2.1б.

П2.5.4.1.3. Дозиметр размещается вплотную к поверхности фантома при градуировке (поверке) и вплотную к телу человека. При поверке используется плоский фантом размером 30×30×15 см из тканеэквивалентного вещества. На фантоме одновременно допускается размещать не более 4-х дозиметров симметрично относительно центра поверхности фантома. При этом расстояние между ближайшими поверхностями дозиметров должно быть не менее 3 см.

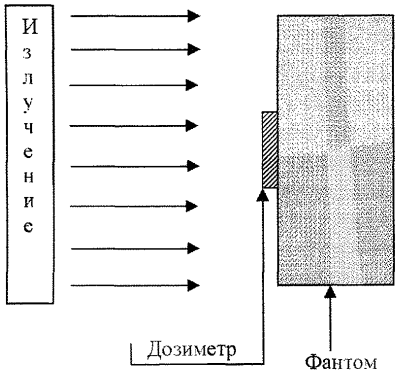


Рисунок П2.1а *- Облучение дозиметра при градуировке (поверке). Мононаправленное (квазимононаправленное) излучение перпендикулярно поверхности фантома со стороны размещения дозиметра (передне-заднее облучение – геометрия AP)*

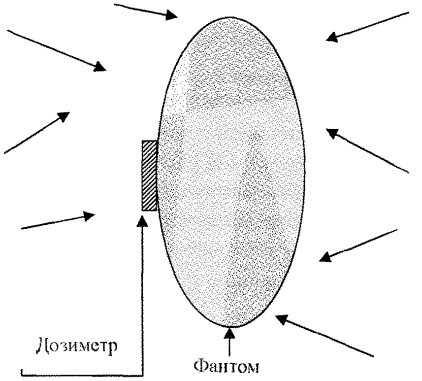


Рисунок П2.1б *- Облучение дозиметра в реальных условиях. Направление излучения относительно фантома (тела человека) и дозиметра произвольное*

П2.5.4.2. Энергетическая зависимость чувствительности.

П2.5.4.2.1. На Рисунке П2.2 представлена энергетическая зависимость чувствительности термолюминесцентного (альбедного) дозиметра относительно индивидуального эквивалента дозы нейтронов $H_p(10)$ при перпендикулярном падении нейтронов на фантом со стороны размещения дозиметра (передне-заднее облучение, AP).

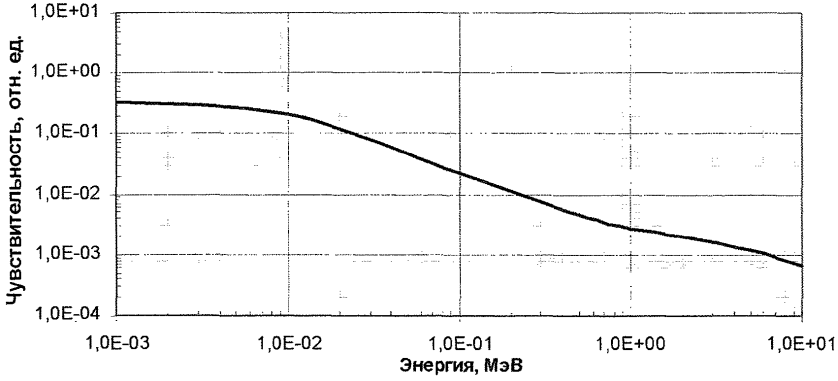


Рисунок П2.2 *- Энергетическая зависимость чувствительности термолюминесцентного (альбедного) дозиметра относительно индивидуального эквивалента дозы нейтронов $H_p(10)$ при перпендикулярном падении нейтронов на фантом со стороны размещения дозиметра (передне-заднее облучение, AP)*

В Таблице П2.2 приведены значения поправочных коэффициентов для показаний термолюминесцентного дозиметра, отградуированного (поверенного) в поле источника Pu-Be, размещенного в контейнере-коллиматоре установки УКПН-1М, для некоторых спектров нейтронов.

Таблица П2.2 *- Значения поправочных коэффициентов для показаний термолюминесцентного дозиметра, отградуированного (поверенного) в поле источника Ри-Ве, размещенного в контейнере-коллиматоре установки УКПН-1М, для некоторых спектров нейтронов*

Спектр нейтронов	Геометрия облучения АР*)
Cf – спектр спонтанного деления Cf-252	1,03±0,02
Cf(col) – спектр нейтронов источника Cf-252, размещенного в контейнере-коллиматоре установки УКПН	0,79±0,02
Cf(con) – спектр рассеянного излучения от источника Cf-252	0,48±0,03
Cf-15 D_2O – спектр излучения от источника Cf-252, размещенного в центре сферы диаметром 30 см, заполненной тяжелой водой	0,53±0,03

*Примечание: *) – $[H_p(10)]_{Pu\text{-}Be(col)}/H_p(10)$, где $H_p(10)$ – измеренное дозиметром ДВГН-01 значение (показание дозиметра) индивидуального эквивалента дозы для конкретного спектра нейтронов; $[H_p(10)]_{Pu\text{-}Be(col)}$ – индивидуальный эквивалент дозы для спектра нейтронов Ри-Ве источника, размещенного в контейнере-коллиматоре установки УКПН (условия поверки).*

П2.5.4.3. Угловая зависимость чувствительности.

Угловая зависимость чувствительности установлена в НТД на термолюминесцентный дозиметр (как правило, ±15 % для углов от 0 до 60 градусов относительно направления перпендикулярного плоскости размещения детекторов).

П2.5.4.4. Погрешность измерения индивидуального эквивалента дозы за счет вклада в дозу гамма-излучения.

На Рисунке П2.3 представлена расчетная зависимость погрешности измерения индивидуального эквивалента дозы нейтронов от вклада гамма-излучения в суммарную дозу.

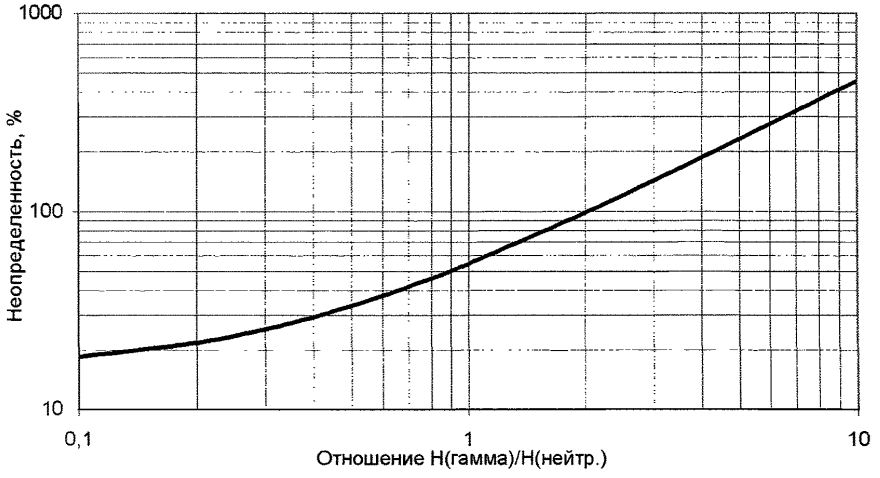


Рисунок П2.3 *- Зависимость погрешности (неопределенности) измерения индивидуального эквивалента дозы нейтронов от вклада гамма-излучения в суммарную дозу*

П2.5.4.5. На рис. П2.4 показана зависимость показаний термолюминесцентного дозиметра для разных расстояний от фантома от энергии нейтронов.

В Таблице П2.3 приведены относительные значения показаний термолюминесцентного дозиметра на расстояниях 1 и 2 см (нормированные на показания на расстоянии 0,5 см) для некоторых спектров нейтронов.

Таблица П2.3 *- Относительные значения показаний термолюминесцентного дозиметра на расстояниях 1 и 2 см (нормированные на показания на расстоянии 0,5 см) для некоторых спектров нейтронов*

Спектр нейтронов (источник нейтронов)	1 см	2 см
Cf – спектр спонтанного деления источника Cf-252	0,72	0,59
Cf(col) – спектр нейтронов источника Cf-252, размещенного в контейнере-коллиматоре установки УКПН	0,75	0,60
Cf(con) – спектр рассеянного излучения от источника Cf-252	0,74	0,60
Pu-Be (col) – спектр нейтронов источника Pu-Be, размещенного в контейнере-коллиматоре установки УКПН	0,74	0,61

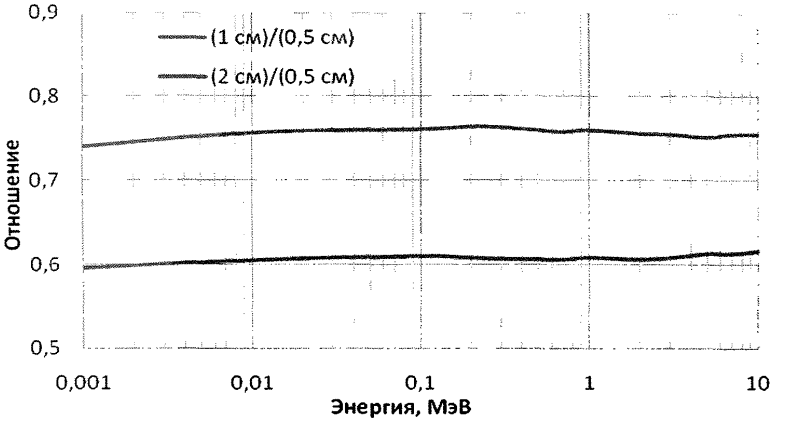


Рисунок П2.4 *- Зависимость показаний дозиметра ДВГН-01 для разных расстояний от фантома (нормировано на расстояние 0,5 см) от энергии нейтронов*

П2.5.4.6. Погрешность за счет изменения положения детектора в кассете дозиметра.

В кассете детекторы закреплены на определенных местах, поэтому этой погрешностью можно пренебречь.

П2.5.4.7. Дополнительная погрешность в показаниях нечувствительного к нейтронам ^{7}LiF детектора за счет гамма-излучения, образующегося при взаимодействии нейтронов с фантомом, с воздухом, с материалом детектора и кассеты.

Эта погрешность мала по сравнению с погрешностью от других влияющих факторов, и ею можно пренебречь.

П2.5.4.8. Потеря чувствительности в процессе набора дозы.

В отдельных термолюминесцентных системах (например, АКИДК-301) потеря чувствительности частично учитывается программно.

П2.5.4.9. Потеря информации при хранении дозиметров после облучения (фединг).

Как потеря чувствительности, так и фединг, зависят от выбранного режима считывания (скорости нагрева детектора). Если не учитывать эти эффекты, происходит занижение результатов измерений дозы. При этом погрешность результата считывания с занижением фотонной дозы варьируется от 5% в год (скорость нагрева 0,2 град/с) до 20% за три месяца (скорость нагрева 20 град/с). Зависимость фединга и потери чувствительности от времени для LiF(Mg,Ti) имеют небольшие различия, и корректировка проводится по усредненному результату относительно времени последнего отжига дозиметра в тракте (Рисунок П2.5). Более сложная задача – определение потерь при нейтронном облучении. Из-за наличия процессов без излучательных переходов в плотных треках излучения с высокой ЛПЭ, к которым можно отнести нейтронное излучение в ^{6}LiF, фе-

динг аномально высок и колеблется от 25% до 40% за квартал в зависимости от скорости считывания. При этом предварительная термообработка перед считыванием, которая предполагается в приборах типа «Harshaw» и «ДОЗАКУС», не аннулирует эту погрешность. Необходимо вводить поправки на корректировку данного эффекта в методику выполнения измерений.

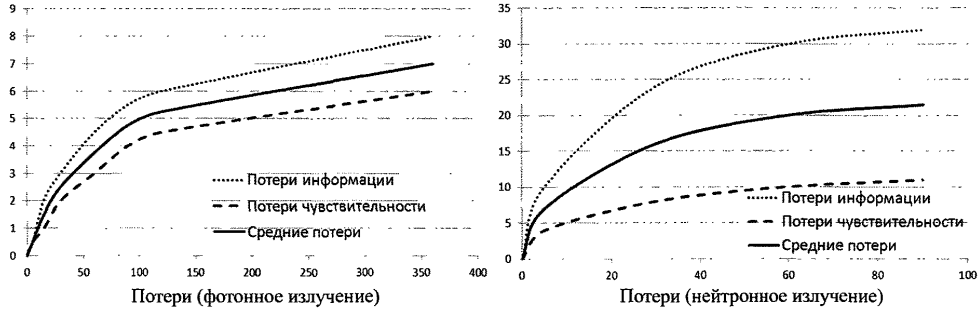


***Рисунок П2.5** - Потери (занижение показаний дозы в %) для фотонного и нейтронного излучения от времени (дни)*

П2.5.4.10. Собственный фон (самооблучение) дозиметра.

Самооблучение после хранения дозиметров в течение 30 суток указывается в НТД на дозиметр (как правило, не превышает 0,05 мЗв). При использовании нескольких дозиметров из партии для контроля фона погрешностью за счет самооблучения можно пренебречь.

П2.5.5. Основные факторы, влияющие на погрешность (неопределенность) оценки значений эффективной дозы по результатам измерения индивидуального эквивалента дозы.

П2.5.5.1. Энергетическая зависимость коэффициента перехода от индивидуального эквивалента дозы к эффективной дозе (геометрия облучения AP) приведена на Рисунке 2.6, а значения коэффициента перехода для некоторых спектров нейтронов приведены в Таблице П2.4.

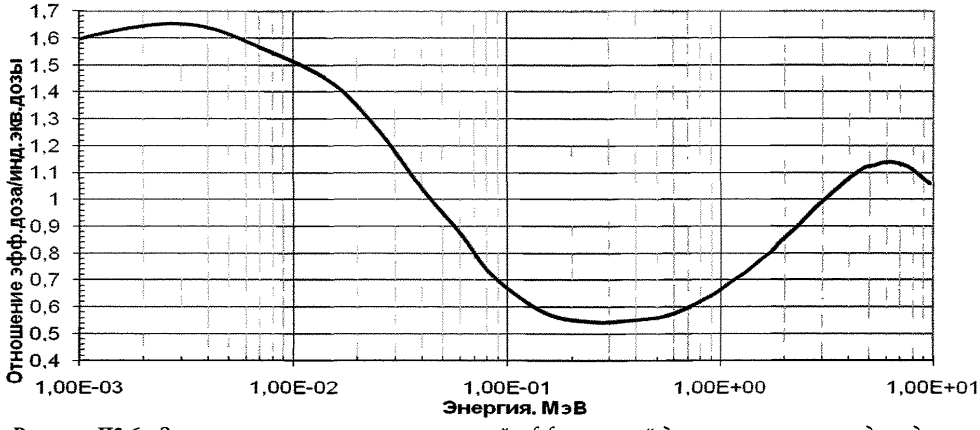


***Рисунок П2.6** - Зависимость отношения значений эффективной дозы к значениям индивидуального эквивалента дозы от энергии нейтронного излучения при облучении в геометрии AP*

Таблица П2.4 *– Значения коэффициента перехода от индивидуального эквивалента дозы к эффективной дозе (геометрия облучения АР) для некоторых спектров нейтронов*

Спектр нейтронов (источник нейтронов)	Коэффициент перехода от индивидуального эквивалента дозы к эффективной дозе (геометрия облучения АР)
Cf – спектр спонтанного деления источника Cf-252	0,83
Cf(col) – спектр нейтронов источника Cf-252, размещенного в контейнере-коллиматоре установки УКПН	0,84
Cf(con) – спектр рассеянного излучения от источника Cf-252	0,72
Pu-Be – спектр источника Pu-Be	0,994
Pu-Be (col) – спектр нейтронов источника Pu-Be, размещенного в контейнере-коллиматоре установки УКПН	0,965
Pu-Be (con) – спектр рассеянного излучения от источника Pu-Be	0,81

П2.5.5.2. Угловая зависимость коэффициента перехода от индивидуального эквивалента дозы к эффективной дозе.

Угловая зависимость коэффициента перехода от индивидуального эквивалента дозы к эффективной дозе связана с тем обстоятельством, что показания (отклик) дозиметра будут различаться в зависимости от направления падения нейтронов на тело. На Рисунке П2.7 показана зависимость показаний альбедного дозиметра, размещенного на груди, от направления падения нейтронов относительно направления перпендикулярного груди.

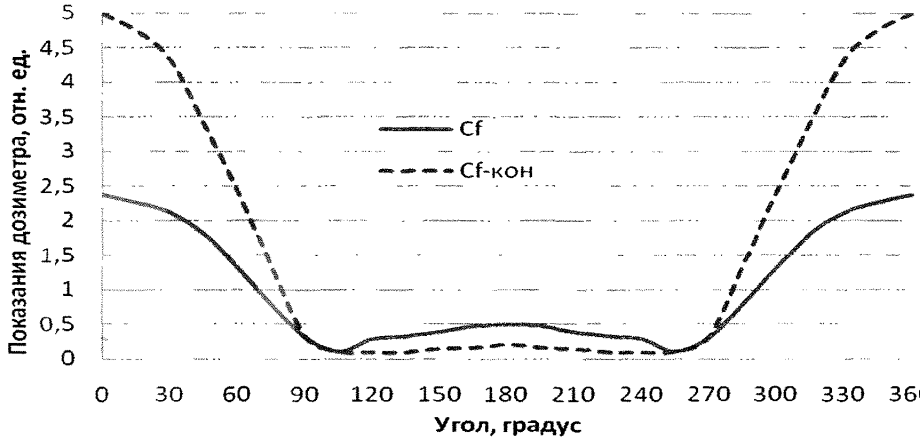


Рисунок П2.7 *- Зависимость показаний дозиметра при изменении угла падения на тело нейтронов со спектром от источника Cf-252 (Cf) и со спектром рассеянных в помещении нейтронов от источника Cf-252 (Cf-кон)*

П2.5.6. Возможность и необходимость введения поправочных коэффициентов, учитывающих влияние определенных факторов (влияющих величин), и, следовательно, уменьшения неопределенности результатов измерения индивидуального эквивалента дозы и эффективной дозы, устанавливается на основе их анализа, теоретических оценок и экспериментальных исследований.

П2.5.6.1. Если поправочный коэффициент не вводится, то неопределенность (погрешность) за счет конкретной влияющей величины берут из руководства по эксплу-

атации или, в случае ее отсутствия в руководстве по эксплуатации, из НТД на общие технические требования (ГОСТ Р МЭК 1066-93).

П2.5.6.2. В тех случаях, когда влияющая величина не приводит к заметному изменению измеряемой величины, поправочный коэффициент принимается равным единице (в этом случае неопределенность за счет данной влияющей величины можно принять равной нулю).

П2.5.6.3. При использовании термолюминесцентных дозиметров для измерения малых значений индивидуальной дозы существенными могут оказаться следующие факторы:

– загрязнение детекторов;

– неравномерность нагрева детекторов;

– излучение, попадающее на ФЭУ с нагревательного элемента;

– возникновение флюоролюминесценции при воздействии повышенной освещенности;

– возникновение триболюминесценции при механическом воздействии на детекторы (например, сильное сжатие детектора пинцетом при загрузке в считыватель);

– возникновение хемилюминесценции при взаимодействии с окружающей средой;

– повышенная температура и влажность;

– возникновение дополнительных ловушек за счет нарушений в структуре детектора, возникающих, в частности, при взаимодействии нейтронов с ядрами вещества детектора и радиатора;

– недостаточный отжиг детекторов;

и др.

Для исключения существенного влияния перечисленных факторов следует строго соблюдать рекомендации руководства по эксплуатации.

П2.5.7. Оценка неопределенности результата косвенных измерений эффективной дозы нейтронов.

П2.5.7.1. Стандартная относительная неопределенность результата измерений эффективной дозы H_{EN} рассчитывается по формуле:

$$u_{cH} = \left(\frac{1}{3} \cdot \left(\sum_i U_{F_i}^2 + \sum_j U_{K_j}^2 + \Delta_{H_p}^2 \right) \right)^{1/2}, \qquad (5)$$

где:

$U_{F_i}^2$ и $U_{K_j}^2$ – относительные неопределенности коэффициентов $F_i(\alpha_i)$ и $K_j(\alpha_j)$ соответственно;

Δ_{H_p} – пределы относительной погрешности средства измерений при измерении в нормальных условиях.

П2.5.7.1.1. Значения коэффициентов $F_i(\alpha_i)$ и $K_j(\alpha_j)$ можно установить только на основе информации об энергетическом и угловом распределении излучения в процессе облучения.

П2.5.7.1.2. При отсутствии информации об энергетическом и угловом распределении значения коэффициентов $F_i(\alpha_i)$ и $K_j(\alpha_j)$ принимаются равными единице, что приводит к **максимальному значению неопределенности**.

В этом случае оценку **максимального значения неопределенности** косвенных измерений эффективной дозы можно провести при следующих значениях составляющих погрешностей (неопределенностей):

Максимальные значения погрешностей, связанных с дозиметром (Таблица П2.4):

– основная погрешность – 15 %;

– энергетическая зависимость чувствительности при облучении в геометрии АР (Таблица П2.2 и Рисунок П2.2) для падающего спектра нейтронов:

а) спектр источника Cf – 5 %;

б) спектр рассеянного излучения от источника Cf – 120 %

– угловая зависимость чувствительности – 15 %;

– дополнительная погрешность за счет температуры – 10 %;

– погрешность за счет влияния сопутствующего гамма-излучения (при вкладе в дозу от гамма-излучения 40 % (Рисунок П2.3)) – 30 %.

Максимальные значения погрешностей, связанные с переходом от показаний дозиметра к эффективной дозе:

– энергетическая зависимость чувствительности при облучении в геометрии АР (Таблица П2.3 и Рисунок П2.5) для падающего спектра нейтронов:

а) спектр источника Cf – 17%;

б) спектр рассеянного излучения от источника Cf – 28 %;

– угловая зависимость – максимальные значения имеют место при облучении со стороны, противоположной стороне, на которой размещается дозиметр (Рисунок П2.7):

а) спектр источника Cf – 2400%;

б) спектр рассеянного излучения от источника Cf – 5000%;

– изменение расстояния дозиметра от поверхности тела – 40% при 2 см (Рисунок П2.4).

П2.5.7.2. Расширенная относительная неопределенность рассчитывается как:

$$U_H = K \cdot u_{cH}, \quad (6)$$

где K – коэффициент охвата.

П2.5.7.3. Оценка максимального значения расширенной неопределенности результатов косвенных измерений эффективной дозы с коэффициентом охвата $K = 2$ (что соответствует доверительной вероятности примерно 0,95) по формуле (6) с использованием приведенных составляющих погрешностей (неопределенностей) дает значения, существенно превышающие требуемые НТД значения допустимых неопределенностей (Таблица П2.1).

П2.5.8. Для уменьшения неопределенности результатов косвенных измерений эффективной дозы необходимы экспериментальные исследования условий облучения и определение поправок, учитывающих реальные условия облучения.

П2.6. Процедура экспериментального определения поправочных коэффициентов для перехода от показаний индивидуального дозиметра к значениям эффективной дозы в реальных условиях проведения измерений

П2.6.1. Метод косвенных измерений эффективной дозы основан на измерении отклика измерителя индивидуального эквивалента дозы, отградуированного (поверенного) на плоском тканеэквивалентном фантоме размером 30×30×15 см, и использовании переходных коэффициентов:

$$H_{En} = \prod_i \iint_{E\Omega} F_{Pi}(E,\Omega) dE d\Omega \cdot H_p, \quad (7)$$

где:

H_{En} – значение эффективной дозы нейтронного излучения;

H_p – показание индивидуального дозиметра в реальных условиях измерения;

$F_{Pi}(E, \Omega)$ – значение поправочного коэффициента за счет i-й влияющей величины (влияющего фактора) для энергии нейтронов E и угла падения нейтронов Ω при переходе от показаний термолюминесцентного дозиметра к эффективной дозе.

Угол Ω отсчитывается от перпендикуляра, восстановленного к поверхности тела в месте размещения дозиметра.

П2.6.1.1. Очевидно, что для использования выражения (7) необходимо знание дифференциального энергетического и углового распределения нейтронов, что на практике недоступно.

П2.6.1.2. Выражение (7) можно упростить, используя априорную и экспериментальную информацию об условиях облучения:

$$H_{En} = F \cdot H_p, \quad (8)$$

где F – коэффициент, определяемый экспериментально с помощью измерителя амбиентного эквивалента дозы нейтронов, используя определенную априорную информацию и экспериментальную процедуру.

П2.6.2. Процедура получения информации об условиях облучения включает в себя ряд действий:

– выбор метода измерений;

– выбор применяемых средств измерений;

– выбор точек контроля;

– проверка неизменности поля излучения и определение равномерности поля излучения в точках контроля;

– измерение амбиентного эквивалента дозы (АЭД) и определение отклика индивидуальных термолюминесцентных дозиметров в точках контроля;

– анализ влияющих величин;

– определение поправочных коэффициентов;

– оценка неопределенности результатов косвенных измерений эффективной дозы;

– выработка рекомендаций по осуществлению записей.

П2.6.3. В измерениях используют следующие СИ: термолюминесцентный дозиметр для измерения индивидуального эквивалента дозы нейтронов и дозиметр-радиометр ДКС-96 с блоком детектирования БДМН-96 для измерения амбиентного эквивалента дозы.

П2.6.3.1. Основные метрологические и технические характеристики дозиметров приведены в Таблице П2.5.

Таблица П2.5 - *Основные метрологические и технические характеристики дозиметров*

Техническая характеристика	Тип термолюминесцентного дозиметра [3)]	Дозиметр ДКС-96
Номер в Государственном Реестре СИ	****	16369-11
Изготовитель (поставщик)	****	ООО «НПП «Доза»
Диапазон измерений: ИЭД нейтронного излучения, мЗв АЭД, мкЗв/ч	0,005–10000	 $0{,}1–10^5$
Пределы допускаемой основной относительной погрешности измерения, %	±15 [1)]	±(25+6/H), где H – численное значение измеряемой величины в мкЗв/ч
Пределы допускаемой основной относительной погрешности измерения ИЭД гамма-излучения, %	±15	
Диапазон регистрируемых энергий нейтронов, мЭв	$2{,}5 \cdot 10^{-8}$–20	$2{,}5 \cdot 10^{-8}$–10

Техническая характеристика	Тип термолюминесцентного дозиметра [3]	Дозиметр ДКС-96
Диапазон регистрируемых энергий гамма-излучения, МэВ	0,015–6	
Энергетическая зависимость чувствительности для набора типовых спектров нейтронов [2], %	±40	±40
Энергетическая зависимость чувствительности в диапазоне от 15 кэВ до 10 МэВ фотонного излучения, %	±30	
Анизотропия чувствительности	±15 для углов от 0 до 60 градусов	±30
Самооблучение дозиметра ДВГН-01 после хранения в течение 30 суток, мЗв	не более 0,05	
Диапазон рабочих температур, °С	От минус 35 до +35	От минус 20 до +40
Пределы допускаемой дополнительной погрешности за счет изменения температуры на каждые 10 °С в рабочем диапазоне температур	±10	±10

[1] – детекторы, входящие в дозиметр, должны иметь индивидуальную градуировку.

[2] – градуировка дозиметра осуществляется в поле Pu-Be источника, размещенного в установке УКПН.

[3] – в Таблице П2.5 в качестве примера указаны значения для дозиметра ДВГН-01.

П2.6.3.2. Значения поправочных коэффициентов зависят от отличия условий измерений от нормальных условий, при которых проводится градуировка (поверка) дозиметров. Нормальные условия при градуировке и поверке СИ приведены в Таблице П2.6.

Таблица П2.6 *- Нормальные условия при градуировке и поверке СИ*

Влияющая величина	Нормальные условия
Энергия нейтронного излучения	Спектр нейтронов Pu-Be источника, размещенного в контейнере-коллиматоре установки УКПН
Направление излучения	Мононаправленное
Вид поля излучения (постоянное, импульсное)	Постоянное (стационарное)
Мощность дозы	В соответствии с РЭ
Положение дозиметра на фантоме при градуировке и поверке	Вплотную к поверхности фантома
Материал фантома	Тканеэквивалентное вещество
Вклад в дозу от сопутствующего гамма-излучения, %	≤ 5
Температура окружающей среды, °С	18–22
Атмосферное давление, кПа	86–106
Относительная влажность, %	50–65
Фоновое излучение, мкЗв/ч	≤ 0,2
Освещенность, $Вт \cdot м^{-2}$	≤ 100 (в соответствии с РЭ)
Загрязнение радиоактивными элементами	Незначительное (допустимое в соответствии с РЭ)

П2.6.4. Подготовка к выполнению измерений

СИ должны иметь действующие свидетельства о поверке.

Подготовка к измерениям проводится в соответствии с руководством по эксплуатации на соответствующее СИ.

П2.6.5. Выполнение измерений

П2.6.5.1. Для проведения измерений выбираются места (точки на высоте от пола примерно 1 м), где условия облучения различаются по какому-либо параметру: энергетическое распределение излучения, угловое распределение излучения, специфика нахождения (перемещения) персонала в месте облучения.

П2.6.5.2. Контроль неизменности поля излучения осуществляется путем анализа результатов измерений с помощью измерителя мощности амбиентного эквивалента дозы (монитора).

П2.6.5.3. В условиях неизменности поля излучения (радиационной обстановки) проводятся измерения мощности амбиентного эквивалента дозы с помощью дозиметра ДКС-96 в 6-ти точках в окрестности выбранной точки, каждый раз смещая дозиметр на расстояние ±(12–15) см в трех взаимно перпендикулярных плоскостях. При этом СКО результата измерений не должно превышать 5%. Допускается проводить измерение в режиме «доза», при этом набранное значение дозы должно быть не менее 1 мкЗв.

Контроль неизменности радиационной обстановки проводится с помощью дополнительного дозиметра-монитора. Допускается нормировка на показания монитора в случаях, когда радиационная обстановка изменяется.

Поле излучения можно считать равномерным, если отклонение любого измеренного значения от среднего значения не превышает ±5%.

П2.6.6. Исследование углового распределения в месте измерения.

П2.6.6.1. Измерения проводятся в точках, где имеет место равномерное поле излучения.

П2.6.6.1.1. Вплотную на поверхность замедлителя блока детектирования дозиметра ДКС-96 размещают 6 термолюминесцентных дозиметров – симметрично во взаимно перпендикулярных плоскостях (в горизонтальной плоскости, проходящей через центр замедлителя, должно быть 4 дозиметра), при этом каждый *i*-й дозиметр располагается в *j*-й точке на поверхности замедлителя. Должна быть обеспечена одинаковость положения дозиметров относительно поверхности замедлителя.

П2.6.6.1.2. Дозиметром ДКС-96 с закрепленными на нем термолюминесцентными дозиметрами проводят измерение амбиентного эквивалента дозы в период накопления дозы термолюминесцентными дозиметрами. Допускается проведение измерения мощности амбиентного эквивалента дозы и получение значения амбиентного эквивалента дозы путем умножения полученного значения мощности дозы на время облучения термолюминесцентных дозиметров.

П2.6.6.1.3. Процедуру по п. П2.6.6.1.2 повторяют 5 раз при взаимной смене положения дозиметров, так, чтобы каждый *i*-й дозиметр последовательно оказывался в каждой *j*-й точке. Каждый раз проводится снятие показания с *i*-го термолюминесцентного дозиметра для *j*-й точки измерения H_{ij}.

П2.6.6.1.4. Для каждой *j*-й точки определяют среднее значение показаний термолюминесцентных дозиметров H_j по формуле:

$$H_j = \frac{1}{6}\sum_{i=1}^{6} H_{ij} .$$

П2.6.6.1.5. Определяют среднее значение H из значений, полученных для каждой точки измерения:

$$H = \frac{1}{6}\sum_{j=1}^{6} H_j .$$

П2.6.6.1.6. Если отклонение значений H_j от среднего значения H не превышает 10%, то поле излучения считают изотропным (или ротационным, как верхней границы изотропного облучения).

П2.6.6.1.7. Если показания дозиметра по нейтронному излучению в каком-либо направлении отличается более чем в 5 раз, поле нейтронного излучения считается мононаправленным.

П2.6.6.1.8. Если условия по п. П2.6.5.1.6.и п. П2.6.5.1.7 не выполняются, определяют преимущественное направление излучения (излучение преимущественно падает со стороны, для которого имеет место наибольшее значение H_j).

В этих случаях следует рассматривать вопрос о целесообразности использования нескольких индивидуальных дозиметров.

П2.6.6.1.9. Если по характеру работы работник перемещается в поле излучения неконтролируемым образом в течение длительного промежутка времени, то можно считать, что работник облучается в ротационном поле излучения.

П2.6.6.1.10. Информация об условиях облучения для каждой точки, в которой проводились измерения, заносится в протокол (запись).

П2.6.7. Измерение амбиентного эквивалента дозы.

Измерение амбиентного эквивалента дозы осуществляется одновременно с облучением термолюминесцентных дозиметров. В неизменяющихся полях излучения допускается в точках наблюдения проводить измерение средней мощности амбиентного эквивалента дозы, и значение амбиентного эквивалента дозы при каждом облучении получать путем умножения полученного значения мощности амбиентного эквивалента дозы на время облучения.

П2.6.8. Анализ влияющих величин.

П2.6.8.1. При одном и том же значении интегральной плотности потока нейтронов значение эффективной дозы зависит от условий облучения. На Рисунке П2.8 приведены зависимости от энергии нейтронов отношений значений эффективной дозы при облучении человека спереди (AP), сзади (PA), в изотропном поле (ISO) и ротационном поле (ROT) к значениям амбиентного эквивалента дозы. Из Рисунка П2.8 видно, что при всех значениях энергии нейтронов значения дозы при изотропном излучении меньше, чем при ротационном облучении.

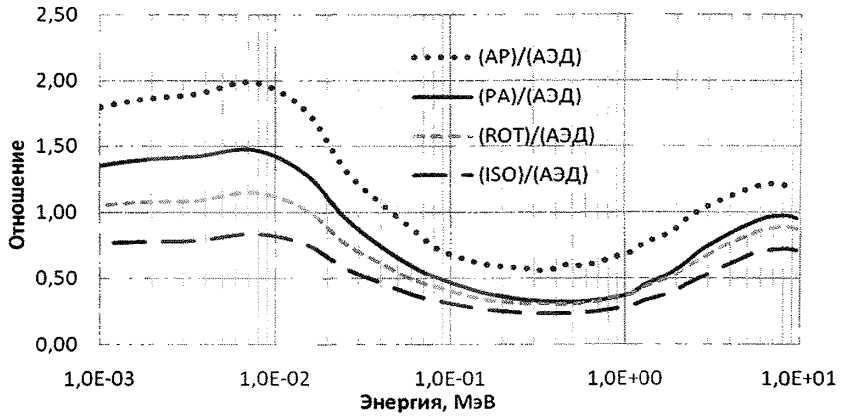


***Рисунок П2.8** - Зависимости от энергии нейтронов отношений значений эффективной дозы при облучении человека спереди (AP), сзади (PA), в изотропном поле (ISO) и ротационном поле (ROT) к значениям амбиентного эквивалента дозы*

В Таблице П2.7 приведены значения отношений значений эффективной дозы при облучении человека спереди (AP), сзади (PA), справа (RLAT), слева (LLAT), в изотропном поле (ISO) и ротационном поле (ROT) к значениям амбиентного эквивалента дозы для некоторых спектров нейтронов.

***Таблица П2.7** - Значения отношений значений эффективной дозы при облучении человека спереди (AP), сзади (PA), справа (RLAT), слева (LLAT), в изотропном поле (ISO) и ротационном поле (ROT) к значениям амбиентного эквивалента дозы для некоторых спектров нейтронов*

Спектр нейтронов (источник нейтронов)	AP	PA	RLAT	LLAT	ROT	ISO
Cf – спектр спонтанного деления источника Cf-252	0,87	0,57	0,31	0,35	0,53	0,42
Cf(col) – спектр нейтронов источника Cf-252, размещенного в контейнере-коллиматоре установки УКПН	0,87	0,58	0,31	0,36	0,53	0,42
Cf(con) – спектр рассеянного излучения от источника Cf-252	0,76	0,47	0,23	0,27	0,44	0,34
Pu-Be(col) – спектр нейтронов источника Pu-Be, размещенного в контейнере-коллиматоре установки УКПН	1,01	0,74	0,42	0,48	0,68	0,54

П2.6.8.2. Значение амбиентного эквивалента дозы не зависит от направления падения нейтронов. Это означает, что измеритель амбиентного эквивалента дозы **должен обладать изотропной чувствительностью.**

П2.6.8.3. Отличие показаний термолюминесцентного дозиметра при облучении на плоском тканеэквивалентном фантоме 30×30×15 см и на поверхности замедлителя блока детектирования БДМН-96 при падении направленного пучка нейтронов со стороны термолюминесцентного дозиметра показано на Рисунке П2.9.

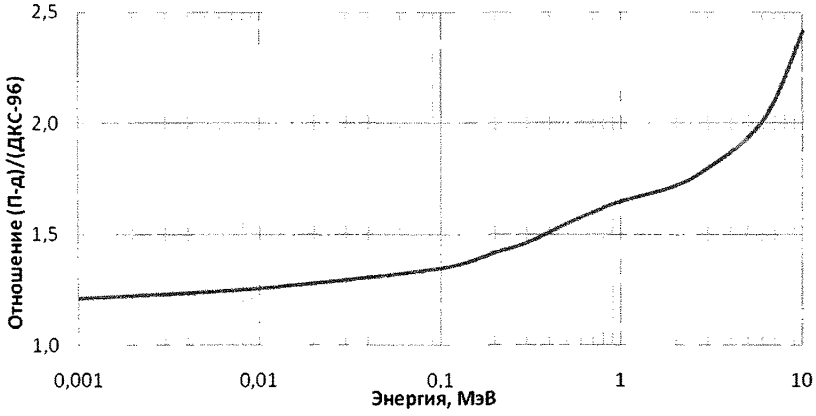


Рисунок П2.9 *- Зависимость отношения показаний дозиметра ДВГН-01 при размещении его на плоском фантоме к показаниям при размещении его на поверхности замедлителя БДМН-96 от энергии нейтронов*

В Таблице П2.8 приведены значения отношений показаний термолюминесцентного дозиметра при размещении его на плоском фантоме к показаниям при размещении его на поверхности замедлителя БДМН-96 для некоторых спектров нейтронов.

Таблица П2.8 *- Значения отношений показаний термолюминесцентного дозиметра при размещении его на плоском фантоме к показаниям при размещении его на поверхности замедлителя БДМН-96 для некоторых спектров нейтронов*

Спектр нейтронов (источник нейтронов)	Отношение
Cf – спектр спонтанного деления источника Cf-252	1,53
Cf(col) – спектр нейтронов источника Cf-252, размещенного в контейнере-коллиматоре установки УКПН	1,46
Cf(con) – спектр рассеянного излучения от источника Cf-252	1,25
Pu-Be(col) – спектр нейтронов источника Pu-Be, размещенного в контейнере-коллиматоре установки УКПН	1,51

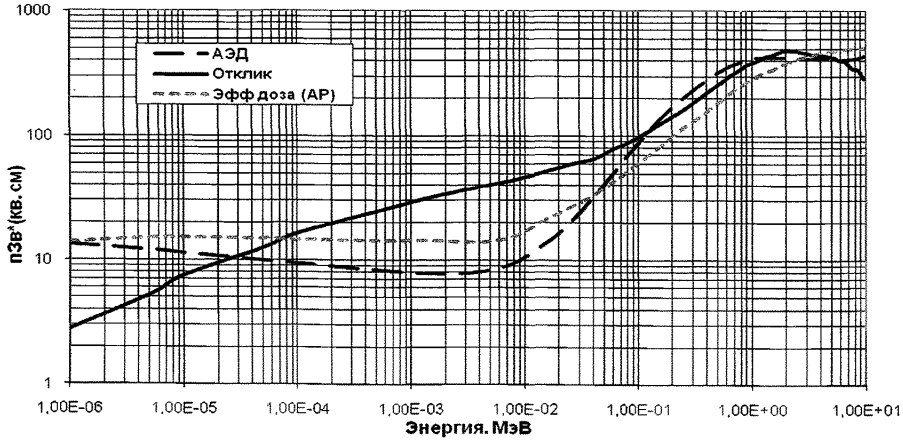


Рисунок П2.10 *- Зависимости значений удельного АЭД, удельной эффективной дозы при облучении в передне-задней геометрии (АР) и отклика дозиметра ДКС-96 от энергии нейтронов*

П2.6.8.4. Энергетическая зависимость чувствительности дозиметра-радиометра ДКС-96 с блоком детектирования БДМН-96.

На Рисунке П2.10 показаны зависимости значений удельного АЭД, удельной эффективной дозы при облучении в передне-задней геометрии (АР) и отклика дозиметра ДКС-96 от энергии нейтронов.

В Таблице П2.9 приведены значения отношений показаний дозиметра ДКС-96, отградуированного в единицах АЭД нейтронов в поле Pu-Be источника, размещенного в установке УКПН-1М, к значению АЭД для некоторых спектров нейтронов.

Таблица П2.9 *- Значения отношений показаний дозиметра ДКС-96, отградуированного в единицах АЭД нейтронов в поле Pu-Be источника, размещенного в установке УКПН-1М, к значению АЭД для некоторых спектров нейтронов*

Спектр	Удельный АЭД (нормированный на единичный флюэнс для спектра)	Отклик дозиметра ДКС-96 на единичный флюэнс, нормированный на значение удельного АЭД для спектра Pu-Be источника, размещенного в установке УКПН-1М	Отношение показаний дозиметра ДКС-96, отградуированного в единицах АЭД нейтронов в поле Pu-Be источника, размещенного в установке УКПН-1М, к значению АЭД дозы в полях с различными спектрами
Pu-Be-кол (Спектр Pu-Be источника, размещенного в установке УКПН-1М)	358,4	358,6	1,000
Pu-Be	400,5	397,4	0,992
Cf	382,0	387,7	1,015
Cf-кон (Спектр рассеянного излучения)	187,3	185,6	0,991
Cf-кол (Спектр Cf источника, размещенного в установке УКПН-1М)	339,6	345,1	1,019

П2.6.8.5. Влияние вклада гамма-излучения в суммарную дозу на погрешность измерения дозы от нейтронов показано на Рисунке П2.3.

П2.6.9. Определение коэффициента *F*, используемого в выражении (8).

П2.6.9.1. Определение коэффициента *F* осуществляется для следующих условий облучения:

– направленное поле, ротационное поле или изотропное поле – определяется на основе анализа результатов по п.П2.6.6;

– спектр излучения предполагается как суперпозиция спектра деления и рассеянного спектра.

П2.6.9.2. Коэффициент *F* определяется как:

$$F = H^*/(H_F \cdot F_1 \cdot F_2 \cdot F_3 \cdot F_4 \cdot F_5 \cdot F_6 \cdot F_7 \cdot F_8), \quad (10)$$

где:

H^* – измеренное ДКС-96 значение АЭД;

H_F – результат измерения с помощью термолюминесцентного дозиметра при определении коэффициента, при этом значение H_F определяется в зависимости от углового распределения поля излучения:

– для направленного излучения как среднее значение показаний дозиметров в точке *j*, где достигается максимальное значение:

$$H_F = H_j = \frac{1}{6}\sum_{i=1}^{6} H_{ij}, \quad (11)$$

– для ротационного (изотропного) излучения как среднее значение совокупностей средних значений показаний дозиметров в каждой точке *j*:

$$H_F = \frac{1}{6}\sum_{j=1}^{6} H_j, \quad (12)$$

где:

$$H_j = \frac{1}{6}\sum_{i=1}^{6} H_{ij};$$

F_1 – коэффициент, относящийся к равномерности и неизменности поля излучения, можно принять равным единице. Неопределенность коэффициента при мониторировании поля излучения в случае необходимости может составить ±5%;

F_2 – коэффициент, связанный с анизотропией чувствительности термолюминесцентного дозиметра, принимается равным единице с неопределенностью в соответствии с ТУ в пределах ±15%;

F_3 – коэффициент, связанный с анизотропией чувствительности дозиметра-радиометра ДКС-96, принимается равным единице с неопределенностью:

– 0% для направленного поля (совпадение с условиями при поверке);

– 5% для ротационного и изотропного поля;

F_4 – коэффициент перехода от показаний дозиметра ДКС-96, отградуированного в поле источника Pu-Be, размещенного в контейнере-коллиматоре, к значению АЭД (принимается равным 1 с неопределенностью в пределах ±1% (Таблица П2.9));

F_5 – коэффициент перехода от значений эффективной дозы к значениям АЭД принимается равным 2,08 для ротационного облучения и 1,23 для передне-заднего облучения с неопределенностью ±10% (Рисунок П2.7 и Таблица П2.7);

F_6 – коэффициент, учитывающий различия отношения показаний термолюминесцентного дозиметра в геометрии передне-заднего и ротационного облучения (Рисунок П2.6) и отношения эффективной дозы в геометрии передне-заднего и ротационного облучения, значение которого принимается равным 1,46 с неопределенностью ±10%;

F_7 – коэффициент, учитывающий различный вклад фантомов (шар и параллелепипед) в результат измерений с помощью термолюминесцентного дозиметра, значение которого принимается равным 1,42 с неопределенностью ±10% (Таблица П2.8);

F_8 – коэффициент, учитывающий энергетическую зависимость чувствительности дозиметра-радиометра ДКС-96, принимается равным 1,0 с неопределенностью ±1% (Таблица 2.9);

F_9 – коэффициент, учитывающий влияние сопутствующего гамма-излучения на результат измерений, принимается равным 1, при этом погрешность за счет влияния сопутствующего гамма-излучения изменяется в зависимости от величины вклада гамма-излучения (Рисунок П2.3). Например, при вкладе в дозу от гамма-излучения 40% (Рисунок П2.3) погрешность может составить 30%.

Для ротационного облучения в поле со спектром деления с рассеянным излучением значение поправочного коэффициента и эффективной дозы определяется как:

$$F = 0{,}23 \cdot H^*/H_F. \quad (13)$$

Для передне-заднего облучения в поле со спектром деления с рассеянным излучением значение поправочного коэффициента определяется как:

$$F = 0{,}57 \cdot H^*/H_F. \quad (14)$$

Для изотропного облучения в поле со спектром деления с рассеянным излучением значение поправочного коэффициента и эффективной дозы определяется как:

$$F = 0{,}18 \cdot H^*/H_F. \quad (15)$$

П2.6.9.3. Условия измерений, расположение мест (точек) для проведения измерений с определенными коэффициентами оформляются соответствующей записью.

П2.6.10. Оценка неопределенности результата измерений эффективной дозы в соответствии с выражением (8).

П2.6.10.1. Стандартная относительная неопределенность результата измерений эффективной дозы определяется в соответствии с выражениями:

$$u^+ = \left(\frac{1}{3} \sum_i U_{K_i}^2 + \left(U_1^+\right)^2 + \left(U_2^+\right)^2 \right)^{1/2}, \quad (16)$$

$$u^- = \left(\frac{1}{3} \sum_i U_{K_i}^2 + \left(U_1^-\right)^2 + \left(U_2^-\right)^2 \right)^{1/2}, \quad (17)$$

где u_{K_i} – неопределенность коэффициента F_i;

U_1^+, U_1^- – относительные неопределенности в сторону больших и меньших значений результата измерений термолюминесцентным дозиметром;

U_2^+, U_2^- – относительные неопределенности в сторону больших и меньших значений результата измерений дозиметром ДКС-96.

U_1^+, U_1^-, U_2^+, U_2^- определяются по формулам:

$$U^+ = \frac{\delta}{1-\delta},$$

$$U^- = \frac{\delta}{1+\delta},$$

где δ – основная погрешность термолюминесцентного дозиметра или дозиметра ДКС-96 соответственно 15% и 30%.

П2.6.10.2. Расчет по формулам (16) и (17) (без учета неопределенности за счет вклада гамма-излучения) дает следующие результаты:

$u^+ = 30\%$;

$u^- = 21\%$.

П2.6.10.3. Расширенная неопределенность с коэффициентом охвата $K = 2$ составляет 60% и 42% соответственно для больших и меньших значений эффективной дозы.

П2.6.10.4. Неопределенность результатов измерений, получаемых с помощью данной методики, удовлетворяет требованиям к неопределенности результатов измерений (Таблица П2.1).

П2.7. Требования безопасности

П2.7.1. При проведении измерений должны соблюдаться требования Норм радиационной безопасности НРБ99/2009 и Основных санитарных правил обеспечения радиационной безопасности ОСПОРБ-99/2010.

Дополнение А (справочное) к Приложению 2
Форма протокола определения радиационных условий, характеризующих поле нейтронного излучения на рабочих местах

Условное обозначение рабочего места	Дата измерений	Характеристика поля нейтронов по результатам измерений (направленное, ротационное, изотропное)	Показания дозиметра-радиометра ДКС-96, мЗв	Среднее значение показаний термолюминесцентного дозиметра, мЗв	Значение коэффициента перехода
			№_____	№№ _____	

Форма протокола регистрации дозовых нагрузок персонала на рабочих местах

ФИО	Условное обозначение рабочего места	Время работы, час	Показания термолюминесцентного дозиметра, мЗв	Значение коэффициента	Значение эффективной дозы

Приложение 3 (справочное)
Требования к метрологическому, методическому и аппаратурному обеспечению дозиметрии нейтронов

П3.1.1. Общие положения

Требования, предъявляемые к техническим характеристикам дозиметров нейтронов, зависят от характеристик контролируемого нейтронного излучения, при этом следующие характеристики излучения могут влиять на технические характеристики дозиметров нейтронов:

– энергетическое распределение нейтронов;

– угловое распределение нейтронов;

– соотношение гамма-нейтронных доз в смешанном гамма-нейтронном поле излучения;

– временная характеристика поля нейтронов.

Технические и метрологические характеристики дозиметров нейтронов определяются возможностями приборостроения и метрологии дозиметрии нейтронов. Требования к характеристикам дозиметров нейтронов, диктуемые производственными необходимостями, приводятся в стандартах.

П3.1.2. Требования к метрологическому и методическому обеспечению дозиметрии нейтронного излучения

Дозиметрические измерения относятся к сфере государственного регулирования и нормативные документы Государственной системы обеспечения единства измерений определяют следующие требования к обеспечению контроля дозы облучения персонала:

– для контроля дозы облучения персонала должны применяться средства измерений утвержденного типа, прошедшие испытания, внесенные в федеральный информационный фонд по обеспечению единства измерений и проходящие периодическую поверку в установленном порядке;

– методики измерения должны удовлетворять требованиям ГОСТ 8.638-2013 и МИ 2453-2000 и быть аттестованны в установленном порядке;

– в соответствии с п.1 ст.5 главы 2 ФЗ «Об обеспечении единства измерений» при выполнении прямых измерений с применением средств измерений утвержденного типа, прошедших поверку, не требуется аттестованная методика измерений;

– службы организаций, осуществляющие радиационный контроль, должны быть аккредитованы на техническую компетентность в установленном порядке.

П3.1.3. Требования к техническим и метрологическим характеристикам дозиметров нейтронного излучения

Стандарты с техническими и метрологическими требованиями к средствам контроля ядерной и радиационной безопасности разработаны в подкомитете 45В «Приборы радиационной защиты» Технического комитета 45 «Ядерное приборостроение» Международной электротехнической комиссии (МЭК), в подкомитете ПК2 «Радиационная защита» Технического комитета ТК 85 «Атомная энергия» Международной организации по стандартизации (ИСО).

Технические и метрологические требования к дозиметрам (мощности) амбиентного эквивалента дозы $H^*(10)$ и индивидуального эквивалента дозы $H_p(10)$ нейтронного излучения изложены в стандартах МЭК и ИСО:

– МЭК 61322, ред. 1, 1994-11. Приборы радиационной защиты – Стационарные измерители мощности эквивалента дозы для нейтронного излучения от тепловой энергии до 15 МэВ;

– МЭК 61005, ред. 3, 2014-07. Приборы радиационной защиты – Измерители амбиентного эквивалента дозы (мощности) нейтронов;

– МЭК 61526, ред. 3, 2010-07. Приборы радиационной защиты - Измерение эквивалентов индивидуальной дозы $H_p(10)$ и $H_p(0,07)$ для рентгеновского, гамма-, нейтронного и бета-излучения – Индивидуальные дозиметры с непосредственной индикацией показаний эквивалента дозы;

– ИСО 21909, ред. 1, 2005-06-15. Пассивные нейтронные дозиметры – Характеристики и требования к испытаниям.

Требования вышеуказанных стандартов к средствам измерения параметров ионизирующих излучений базируются на следующих определениях.

Действительный диапазон измерения – это диапазон значений измеряемой величины, в котором рабочие характеристики средства измерения удовлетворяют требованиям соответствующего стандарта.

Стандартные условия калибровки – источник эталонного нейтронного излучения, соответствующий рекомендациям стандарта ИСО 8529, представляющий собой один из источников ^{241}Am/Be*, ^{252}Cf, ^{252}Cf с замедлителем в виде сферы с тяжелой водой D_2O диаметром 30 см, излучение которого в виде коллимированного равномерного пучка нейтронов, падающего на детектор средства измерения перпендикулярно его плоскости в направлении, указанном изготовителем при нормальных внешних условиях: температуре, влажности, давлении и пренебрежимо малых уровнях внешних влияющих условий: внешнее электромагнитное поле, радиоактивное загрязнение, радиоактивный фон.

*Примечание: *в России применяются аналогичные источники Ри-Be.*

Собственная погрешность средства измерения – разность между индицируемым значением измеряемой величины и условно истинным значением величины в точке измерения в стандартных условиях калибровки.

Относительная собственная погрешность средства измерения – процентное отношение собственной погрешности к условно истинному значению величины в стандартных условиях калибровки.

Отклик – отношение индицируемой средством измерения величины к условно истинной величине в стандартных условиях калибровки.

Время отклика средства измерения – время показания от 90% до 110% нового значения при резком изменении мощности дозы.

Коэффициент вариации (для оценки статистической флуктуации) – отношение оценки стандартного отклонения *s* к среднему арифметическому значению совокупности *n* измерений.

Ограничение верхней границы действительного диапазона измерения средства измерения обусловлено требованиями к:

- нелинейности чувствительности средства измерения.

Ограничение нижней границы действительного диапазона измерения средства измерения обусловлено требованиями к:

- статистическим флуктуациям показаний средства измерения;
- времени отклика средств измерения.

Эталонное излучение – все испытания средств измерения должны проводиться с использованием источника ^{137}Cs, если не указано иное. Отклик средств измерения к бета-излучению нуклида ^{90}Sr/^{90}Y (ИСО 6980-1 и ИСО 6980-3) должен быть заявлен производителем. При определении отклика средств измерения к нейтронам необходимо использовать источники ^{252}Cf или ^{241}Am/Be* (ИСО 8529).

*Примечание: *в России применяются идентичные источники Ри-Be.*

Собственная погрешность средства измерения определяется в стандартных условиях калибровки и обусловлена:

– нелинейностью чувствительности средства измерения;

– статистическими флуктуациями.

Неопределенность результатов измерения обусловлена:

– собственной погрешностью средства измерения;

– неопределенностью, обусловленной зависимостями чувствительности средства измерения от энергии и угла падения излучения на детектор измерителя;

– дополнительными неопределенностями, обусловленными отличиями внешних условий измерения от установленных нормальных: температуры окружающей среды, давления, внешнего электромагнитного поля и др.

П3.1.4. Требования к техническим и метрологическим характеристикам стационарных измерителей мощности дозы нейтронного излучения приведены в стандарте ***МЭК 61322, ред. 1, 1994-11. Приборы радиационной защиты – Стационарные измерители мощности эквивалента дозы, предупреждающие сборки и мониторы для нейтронного излучения от тепловой энергии до 15 МэВ.***

Стандарт распространяется на приборы, измеряющие мощность амбиентного эквивалента дозы в диапазоне энергий от тепловых до 15 МэВ, для целей радиационной защиты. Диапазон измерения дозиметров, как правило, от 10 мкЗв в час и выше.

Данный стандарт не может быть непосредственно применим к оборудованию для использования в импульсных радиационных полях, например, исходящих от импульсного излучения или частиц на ускорителях. Он также не распространяется на мониторы критичности, или узлы, предназначенные для предоставления информации о рабочих параметрах ядерных реакторов в целях контроля.

Требования к конструкции

Оборудование должно измерять мощность амбиентного эквивалента дозы *в диапазоне энергий* от тепловых нейтронов до нейтронов с энергиями 15 МэВ.

Время отклика прибора на изменение мощности дозы является важным параметром для выполнения функции дозиметрического контроля. Любая задержка больше, чем 2 с в активации сигнализации, должна быть такой, чтобы доза облучения персонала в результате этой задержки не была бы более 100 мкЗв.

Минимальный *действительный диапазон измерения* дозиметра – *от 10 мкЗв/ч до 100 мЗв/ч.* Если может потребоваться измерение мощности эквивалента дозы до 1 Зв/ч или выше, это должно быть включено в соглашение между потребителем и изготовителем.

При высоких мощностях эквивалента дозы рекомендуется, когда это возможно, в пределах, установленных для статистических флуктуаций, снижать время отклика. При сокращении времени отклика много ниже 1 с необходимо уменьшить статистические флуктуации.

Требования к испытаниям

Должно использоваться *эталонное излучение* нейтронных источников ^{241}Am-Be*, ^{252}Cf или $D(d,n)^3He$. Угол падения излучения – направление калибровки ±10°.

*Примечание: *В РФ применяется источник Ри-Бе.

Относительная собственная погрешность в стандартных условиях калибровки не должна быть более ±30%.

Для целей *радиологической* защиты желательно, чтобы *изменение отклика с энергией нейтронов* на заданном интервале энергий не превышало 50%. Тем не менее, на практике невозможно достичь таких характеристик.

В диапазоне углов падения излучения от 0 до 120° *изменение относительного отклика* не должно быть больше ± 25%. Изготовитель должен указать относительное изменение отклика для углов больше ± 120°.

Статистическая флуктуация: коэффициент вариации должен быть не больше ± 20%.

Время отклика до достижения показаний 90% от нового значения при резком изменений мощности дозы должно быть:

< 100 с для мощности дозы *H*(10)* менее 0,1 мЗв/ч;

< 30 с для мощности дозы *H*(10)* между 0,1 мЗв/ч и 1 мЗв/ч;

< 10 с для мощности дозы *H*(10)* больше 1мЗв/ч.

Отклик на другие внешние ионизирующие излучения

В связи с тем, что блоки такой конструкции, как правило, не реагируют на альфа- или бета-излучение, соответствующие испытания не указываются.

Фотонное излучение, облучению которого подвергается блок детектирования нейтронного излучения, может не только обуславливать показания блока, но и изменять его отклик на нейтронное излучение. По этой причине устанавливаются два отдельных требования:

а) показание при облучении от источника ^{137}Cs с мощностью кермы в воздухе 10 мГр/ч не должно быть больше, чем показание от мощности эквивалента дозы нейтронов 0,1 мЗв/ч.

б) в поле 1 мЗв/ч эталонного нейтронного источника облучение с мощностью кермы в воздухе 10 мГр/ч от источника ^{137}Cs гамма-излучение не должно изменять показание от нейтронного излучения более чем на ±10%.

В стандарте приведены требования к электрическим, электромагнитным, механическим характеристикам и характеристикам окружающей среды. В Приложениях приведены конверсионные коэффициенты между флюенсом нейтронов и дозой H(10) моноэнергетических нейтронов и нейтронов спектров эталонных источников.*

П3.1.5. Технические требования к переносным дозиметрам нейтронного излучения определены в стандарте ***МЭК 61005, ред. 3, 2014-07, Приборы радиационной защиты – Измерители амбиентного эквивалента дозы (мощности) нейтронов.***

Стандарт распространяется на приборы, предназначенные для измерения амбиентного эквивалента дозы (мощности дозы) нейтронов с энергией нейтронов не выше 20 МэВ, и включает в себя как минимум:

– блок детектирования, который может состоять, например, из детектора для тепловых нейтронов и материалов, выполняющих функции замедлителя и поглотителя нейтронов, окружающих детектор;

– измерительный блок с дисплеем для отображения измеряемой величины, который может быть объединен с детектором или подключаться к нему посредством гибкого кабеля.

В настоящем стандарте рассматриваются приборы для диапазона энергий до 20 МэВ. Если показания измерителя включают в себя также значения дозы нейтронного излучения, он должен соответствовать указанным в настоящем стандарте требованиям, относящимся к дозе.

В настоящий стандарт не включены испытания для подтверждения соответствия требованиям к рабочим характеристикам в импульсных радиационных полях. Следует понимать, что блок, соответствующий настоящему стандарту, может оказаться неподходящим для использования в таких полях.

Требования

Неопределенность условно истинного значения дозы (мощности) должна быть меньше, чем ± 20%.

Минимальный действительный диапазон измерения мощности эквивалента дозы *H*(10)* нейтронов должен включать 10 мкЗв/ч.

Относительный отклик в стандартных условиях калибровки должен быть в диапазоне от минус 17% до +25% в *диапазоне измерений* мощности дозы 5 мкЗв/ч – 1 Зв/ч.

Отклик всех измерителей дозы (мощности дозы) нейтронов очень сильно зависит от энергии нейтронов. Для целей радиационной защиты было бы желательно, чтобы изменение отклика в зависимости от энергии нейтронов во всем диапазоне энергий (от тепловой до максимальной энергии), указанной производителем, не превышало коэффициент 1,5. Однако на момент публикации стандарта выполнение такого требования практически не достижимо.

Относительный отклик должен быть в диапазоне:

0,2–8,0 для энергий нейтронов от тепловых до 50 кэВ;

0,5–2,0 для энергии от 50 кэВ до 10 МэВ;

0,2–2,0 для энергий выше 10 МэВ (рекомендуется).

Относительный отклик должен быть не хуже ±25% для углов падения излучения от 0 до 90°; для углов падения от ±90 до ±180 ° должен заявляться производителем.

Время отклика до достижения показаний 90% от нового значения при резком изменении мощности дозы:

– менее 30 с для мощности $H^*(10)$ менее 0,1 мЗв/ч;

– 10 с для мощности $H^*(10)$ между 0,1 мЗв/ч и 1,0 мЗв/ч;

– 4 с для мощности $H^*(10)$ более 1,0 мЗв/ч.

Метод испытаний на соответствие времени отклика дозиметра основан на изменении мощности $H^*(10)$ в 10 раз.

В стандарте также приведены требования к электрическим, электромагнитным, механическим характеристикам и характеристикам окружающей среды, перечню документации. В Приложении А приведены конверсионные коэффициенты из доклада 57 МКРЕ.

П3.1.6. Технические и метрологические требования к индивидуальным электронным дозиметрам для оперативного индивидуального дозиметрического контроля определены в стандарте ***МЭК 61526, ред. 3, 2010-07. Приборы радиационной защиты – Измерение эквивалентов индивидуальной дозы Hp(10) и Hp(0,07) для X-, гамма-, нейтронного и бета-излучения – Индивидуальные дозиметры с непосредственной индикацией показаний эквивалента дозы.***

Стандарт распространяется на индивидуальные дозиметры с непосредственным отсчетом показаний эквивалента дозы, используемые для измерения индивидуальных эквивалентов дозы $H_p(10)$ и $H_p(0,07)$ рентгеновского, гамма-, нейтронного и бета-излучений.

Для индивидуального эквивалента дозы (мощности) $H_p(10)$ рентгеновского и гамма-излучения предусмотрены два минимальных диапазона энергии фотонов. Первый диапазон от 20 кэВ до 150 кэВ предназначен для рабочих мест, в которых используется низкоэнергетическое рентгеновское излучение, например, в медицинской диагностике, второй диапазон от 80 кэВ до 1,5 МэВ – для рабочих мест, где используются высокоэнергетические источники рентгеновского и/или гамма-излучения, например, в промышленности. Для нейтронного излучения минимальный диапазон составляет от 0,025 эВ (тепловые нейтроны) до 5 МэВ. Диапазоны энергии могут быть расширены для всех энергий, на которые распространяются соответствующие стандарты ИСО для эталонных полей излучения.

Для индивидуального эквивалента дозы $H_p(0,07)$ рентгеновского и/или гамма-излучений минимальный диапазон энергии фотонов составляет от 20 кэВ до 150 кэВ, для бета-излучения минимальный диапазон составляет от 0,2 МэВ до 0,8 МэВ.

В некоторых применениях, например, на установках ядерных реакторов, в которых присутствуют фотоны с энергией 6 МэВ, требуется проведение измерений (мощности) индивидуального эквивалента дозы $H_p(10)$ фотонного излучения с энергиями до 10 МэВ. В других применениях требуется проведение измерений $H_p(10)$ ниже 10 кэВ. Примеры расширенных диапазонов энергии приведены в Приложении С стандарта ИСО.

Требования

Механические характеристики: размеры дозиметров не должны превышать 15×3×8 см, объем 300 см^3, а масса гамма-нейтронных дозиметров не должна превышать 200 г.

Действительный диапазон измерений дозиметров должен охватывать как минимум диапазон от 100 мкЗв до 1 Зв для величины $H_p(10)$ и от 1 мЗв до 10 Зв для величины $H_p(0,07)$, а измеряемые мощности дозы должны находиться в диапазоне от 1 мкЗв/ч до 1 Зв/ч.

Испытания: относительная неопределенность (расширенная ($k = 2$)) *условно истинного значения* эквивалента дозы или мощности дозы должна быть менее 10%.

Минимальные диапазоны измерения:

Для $H_p(0,07)$ гамма-, рентгеновского и бета-излучения:

– для дозы – от 1 мЗв до 10 Зв и

– для мощности дозы – от 5 мкЗв/ч до 1 Зв/ч;

Для $H_p(10)$ гамма-излучения:

– для дозы – от 100 мкЗв до 1 Зв и

– для мощности дозы – от 0,5 мкЗв/ч до 1 Зв/ч;

Для $H_p(10)$ нейтронного излучения:

– для дозы – от 100 мкЗв до 1 Зв и

– для мощности дозы – от 5 мкЗв/ч до 1 Зв/ч.

Изменение относительной чувствительности, обусловленное нелинейностью, должно лежать в диапазоне от минус 17% до +25% по всему действительному диапазону измерений для выбранного эталонного рентгеновского, гамма-излучения или бета-излучения в стандартных условиях калибровки.

Статистические флуктуации: коэффициент вариации по эквивалентам дозы $H_p(0,07)$, $H_p(10)$ должны быть в пределах:

– для $Ho < H < 11Ho$: $(16 - H/Ho)\%$;

– для $H > 11Ho$: 5%,

где Ho – нижняя граница диапазона измерения доз.

Изменения относительной чувствительности измерения $H_p(10)$, $H_p(0,07)$ и их мощностей, обусловленные изменениями энергии и угла падения фотонного, нейтронного и бета-излучения, должны находиться в интервале от 0,71 до 1,67 для разных энергий и углов падения излучения от 0° до 60°.

Время отклика дозиметра при резком повышении мощности эквивалента дозы. Индикатор дозиметра должен показывать значение конечной мощности эквивалента дозы с погрешностью менее, чем минус 17% ÷ +25% через 10 с после ее воздействия на дозиметр. В случае ступенчатого повышения мощности эквивалента дозы, сигнализация, порог которой установлен на половине конечного значения мощности эквивалента дозы, должна срабатывать не более чем через 2 с. Данные требования должны распространяться на значения мощности эквивалента доз от фоновых значений до значений выше 1 мЗв/ч для мощности $H_p(10)$ рентгеновского и гамма-излучения, 10 мЗв/ч для мощности $H_p(0,07)$ рентгеновского, гамма- и бета-излучения, и 10 мЗв/ч для мощности $H_p(10)$ нейтронного излучения. В качестве альтернативы, любая задержка срабатывания не должна приводить к получению дозы свыше 10 мкЗв для $H_p(10)$ рентгеновского и гамма-излучения, свыше 100 мкЗв для $H_p(0,07)$ рентгеновского, гамма- и бета-излучения и свыше 500 мкЗв для $H_p(10)$ нейтронного излучения.

В стандарте также приведены требования к электрическим, электромагнитным, механическим характеристикам и характеристикам окружающей среды, перечню документации к приборам. В Приложении С приведены категории индивидуальных дозиметров, рекомендующие их характеристики в зависимости от целей их использования.

Категории, приведенные в Таблице П3.1, могут быть использованы для классификации индивидуальных дозиметров в целях утверждения типа.

***Таблица П3.1** - Категории индивидуальных дозиметров.*

Категория	Обозначение	Минимальный диапазон	Варианты расширений		
			Для влияющей величины энергии	Для диапазона дозы	Для влияющей величины мощности дозы
$H_p(10)$ гамма-излучение	**G**	От 80 кэВ до 1,5 МэВ [a] От 100 мкЗв до 10 Зв [b] От 0,5 мкЗв/ч до 1 Зв/ч [c]	***m*** (ср.): нижний предел 60 кэВ ***l*** (низк.): нижний предел 20 кэВ ***h*** (выс.): вкл. 6 МэВ	***f***: нижний предел 10 мкЗв	***a*** (аварийный): верхний предел 10 Зв/ч
$H_p(10)$ рентгеновское излучение	**X**	От 20 кэВ до 150 кэВ [a] От 100 мкЗв до 10 Зв [b] От 0,5 мкЗв/ч до 1 Зв/ч [c]	***l*** (низк.): нижний предел 10 кэВ ***h*** (выс.): вкл. 300 кэВ	***f***: нижний предел 10 мкЗв	***a*** (аварийный): верхний предел 10 Зв/ч
$H_p(10)$ нейтронное излучение	**N**	От 0,025 эВ до 5 МэВ [a] От 100 мкЗв до 1 Зв [b] От 5 мкЗв/ч до 1 Зв/ч [c]	–	***f***: нижний предел 10 мкЗв	***a*** (аварийный): верхний предел 10 Зв/ч
$H_p(0,07)$ рентгеновское, гамма-излучение	**S** (кожа)	От 20 кэВ до 150 кэВ [a] От 1 мЗв до 10 Зв [b] От 5 мкЗв/ч до 1 Зв/ч [c]	***l***: нижний предел 15 кэВ ***n***: нижний предел 10 кэВ	***g***: нижний предел 100 мкЗв	***a*** (аварийный): верхний предел 10 Зв/ч
$H_p(0,07)$ бета-излучение	**B**	От 200 кэВ до 800 кэВ ($E_{ср.}$) [a] От 1 мЗв до 10 Зв [b]	***l***: нижний предел 60 кэВ ($E_{ср.}$)	***g***: нижний предел 100 мкЗв	***a*** (аварийный): верхний предел 10 Зв/ч

[a] Минимальный диапазон энергии
[b] Минимальный действительный диапазон измерений
[c] Минимальный диапазон использования (мощность дозы)

П3.1.7. Технические и метрологические требования к индивидуальным учетным дозиметрам для текущего ИДК определены в стандарте ***ИСО 21909, ред.1, 2005-06-15. Пассивные нейтронные дозиметры – Характеристики и требования к испытаниям.***

Стандарт распространяется на индивидуальные накопительные дозиметры, измеряющие индивидуальный эквивалент дозы в диапазоне энергий от тепловых до 20 МэВ. Стандарт охватывает следующие классы пассивных дозиметров нейтронов:

– дозиметры с ядерными фотоэмульсиями (ЯФ, NTED);
– твердотельные трековые дозиметры (ТТД, SSNTD);
– альбедные термолюминесцентные дозиметры (ТЛД, TLAD);
– пузырковые дозиметры (ПД, SED);
– дозиметры с прямым хранением ионов (DIS).

Все испытания должны проводиться при стандартных условиях испытаний, если не указано иное, фактические условия испытаний должны быть указаны в протоколе испытаний. Облучение дозиметров осуществляется на фантоме при испытаниях, связанных с определением зависимости эквивалента дозы от энергии нейтронов и угла падения излучения. Для других испытаний дозиметры можно облучать в воздухе и контрольной величиной может быть флюенс нейтронов.

Эталонные нейтронные излучения для испытаний приведены в стандарте ИСО 8529-1, также могут быть использованы моделируемые нейтронные поля на рабочих местах по стандарту ИСО 12789. Для многих испытаний достаточно одного источника (например, ^{241}Am-Be* или ^{252}Cf).

Примечание. Для испытаний термолюминесцентных альбедных дозиметров может быть использован любой источник нейтронов с достаточной интенсивностью нейтронов низких энергий (лучше применение более замедленных нейтронов).

**Примечание. В РФ принято применение источника Ри-Ве.*

Стандартные условия испытаний:

– внешняя температура от 18 до 22 °С;
– относительная влажность от 50 до 75%;
– давление от 86 до 106 кПа;
– радиационный фон меньше 0,25 мкЗв/ч.

Ниже приведены Таблицы с требованиями к техническим характеристикам разных типов дозиметров.

***Таблица П3.2** - Требования к характеристикам дозиметров с ядерными фотоэмульсиями*

№	Характеристика	Требование к характеристике
1	Однородность партии	Коэффициент вариации показаний *n* дозиметров не должен превышать 30% для $H_p(10)$ больше чем 1 мЗв
2	Воспроизводимость	Не применимо
3	Линейность	Отклик к нейтронам не должен изменяться более чем на 20% для $H_p(10)$ от 0,5 мЗв до 20 мЗв
4	Порог детектирования	Порог детектирования для $H_p(10)$ не должен быть больше чем 0,2 мЗв
5	Фединг (стабильность последней информации)	Фединг треков при нормальных условиях не должен быть больше чем 10%, 15%, 20% и 30% для периодов 3 дня, 10 дней, 30 дней и 90 дней соответственно при сравнений образца с контрольным образцом
6	Старение	Не применимо
7	Остаточный сигнал	Не применимо
8	Самооблучение	Не применимо
9	Облучение другим излучением, кроме нейтронов	Среднее арифметическое значение отклика на нейтроны должно отличаться менее чем на 10% для $H_p(10)$ при облучении дозой между 1 мЗв и 2 мЗв и дополнительном облучении дозой до 3 мЗв излучения от ^{137}Cs по сравнению с дозиметром, не подвергавшимся облучению фотонами
10	Стабильность к разным климатическим условиям	Фединг треков при температуре 40 °С и влажности 100% не должен быть больше чем 10%, 15%, 20% и 30% для периодов 3 дня, 10 дней, 30 дней и 90 дней, когда образец сравнивается с контрольным образцом
11	Влияние света (непрозрачность)	Никакие полосы не должны наблюдаться на испытываемой пленке при облучении 1000 В/м^2 в течение одного часа ксеноновой лампой эквивалентной солнечном свету (295 нм до 769 нм). Средняя оптическая плотность полезной площади пленки не должна отличаться более чем в три экспериментальных стандартных отклонения от средней оптической плотности контрольного образца
12	Физическое повреждение	Не применимо
13	Энергетическая зависимость отклика	Отклик при нормальном падении в заявленном диапазоне энергии не должен изменяться больше чем 50% для эквивалента дозы $H_p(10)$ по крайней мере 1 мЗв
14	Угловая зависимость отклика	Среднее арифметическое отклика дозиметра при углах падения 0°, 15°, 45° и 60° от нормали не должно отличаться более чем на 30% по сравнению с соответствующим откликом при нормальном падении

Таблица П3.3 *- Требования к характеристикам твердотельных трековых дозиметров*

№	Характеристика	Требование к характеристике
1	Однородность партии	Коэффициент вариации показаний *n* дозиметров не должен превышать 15% для $H_p(10)$ больше чем 1 мЗв
2	Воспроизводимость	Не применимо
3	Линейность	Отклик к нейтронам не должен изменяться более чем на 10 % для $H_p(10)$ от 1 мЗв до 10 мЗв
4	Порог детектирования	Порог детектирования для $H_p(10)$ не должен быть больше чем 0,3 мЗв
5	Фединг (стабильность последней информации)	Отклик облученных в начале периода хранения дозиметров не должен отличаться более чем на 30% в течение 90 дней – периода хранения при стандартных условиях испытаний
6	Старение	Отклик облученных в начале периода хранения дозиметров не должен отличаться более чем на 30% в течение 90 дней – периода хранения при стандартных условиях испытаний (Период от производства дозиметров до начала испытаний не должен превышать 90 дней)
7	Остаточный сигнал	Не применимо
8	Самооблучение	Не применимо
9	Облучение другим излучением кроме нейтронов	Отклик на излучение, кроме нейтронов, в частности фотонов ^{137}Cs, должен быть менее 10% в $H_p(10)$. Нулевая точка не должна измениться более чем на 0,5 мЗв для дозиметров, подвергнутых облучению 3 мБк·ч/м^3 радона в 50% равновесия с дочерьми ($F = 0,5$)
10	Стабильность к разным климатическим условиям	Измеренное значение эквивалента дозы не должно отличаться от условно истинного значения более чем на 20% в течение 48-часового хранения при 40 °С и 90% относительной влажности, когда дозиметры облучаются либо в начале либо в конце срока хранения
11	Влияние света (непрозрачность)	Нулевая точка не должна измениться более чем на 1 мЗв при облучении ксеноновой лампой эквивалентной яркому солнечному свету (от 295 нм до 769 нм) до 1000 Вт/м^2 в течение одного дня. При облучении в течение одной недели отклик не должен отличаться от отклика дозиметра, которого держали в темноте, более чем на 10%
12	Физическое повреждение	Не применимо
13	Энергетическая зависимость отклика	Отклик при нормальном падении нейтронов в заявленном диапазоне энергий не должен отличаться более чем на ± 50% для $H_p(10)$ при более 1 мЗв
14	Угловая зависимость отклика	Среднее арифметическое отклика дозиметра при углах падения 0°, 15°, 45° и 60° от нормали не должно отличаться более чем на 40% по сравнению с откликом при нормальном падении. При этом индивидуальный эквивалент дозы должен быть не менее 1 мЗв

***Таблица П3.4** - Требования к характеристикам альбедных термолюминесцентных дозиметров (ТЛД)*

№	Характеристика	Требование к характеристике
1	Однородность партии	Коэффициент вариации эквивалента дозы фотонов для *n* дозиметров не должен превышать 20%
2	Воспроизводимость	Коэффициент вариации эквивалента дозы фотонов для *n* дозиметров не должен превышать 20% для каждого дозиметра отдельно при его облучении в десять раз
3	Линейность	Отклик не должен изменяться более чем на 10%, когда дозиметры облучаются нейтронами, а затем фотонами, производящими эквиваленты дозы между 1 мЗв и 100 мЗв
4	Порог детектирования	Порог детектирования не должен превышать эквивалент дозы фотонного излучения 0,3 мЗв
5	Фединг (стабильность последней информации)	Отклик облученных в начале периода хранения дозиметров не должен отличаться более чем на 10% в течение 90 дней – периода хранения при стандартных условиях испытаний
6	Старение	Не применимо
7	Остаточный сигнал	Остаточный сигнал не должен превышать дозу, соответствующую эквиваленту дозы фотонов 0,3 мЗв, после облучения фотонами соответствующим эквивалентом дозы 10 мЗв
8	Самооблучение	После хранения в течение 60 дней нулевая точка не должна измениться на более 0,3 мЗв эквивалента дозы фотонов
9	Облучение другим излучением кроме нейтронов	Определяется при испытаниях
10	Стабильность к разным климатическим условиям	Эквивалент дозы фотонов не должен отличаться от условно истинного значения более чем на 5% после 30 дней хранения при стандартных условиях испытания или на 10% в течение 48-часового хранения при 40 °С и 90% относительной влажности при облучении дозиметров либо в начале или в конце срока хранения
11	Влияние света (непрозрачность)	Нулевая точка не должна измениться более чем на 0,3 мЗв при облучении ксеноновой лампой эквивалентной яркому солнечному свету (от 295 нм до 769 нм) до 1000 Вт/м^2 в течение одного дня. При облучении в течение одной недели отклик не должен отличаться более чем на 10% от отклика дозиметра, который держали в темноте
12	Физическое повреждение	Не применимо
13	Энергетическая зависимость отклика	Определяется при испытаниях
14	Угловая зависимость отклика	Среднее арифметическое отклика дозиметра при углах падения 0°, 15°, 45° и 60° от нормали не должно отличаться более чем на 40% по сравнению с откликом при нормальном падении. Индивидуальный эквивалент дозы должен быть не менее 1 мЗв

***Таблица П3.5** - Требования к характеристикам пузырковых дозиметров (ПД).*

№	Характеристика	Требование к характеристике
1	Однородность партии	Коэффициент вариации эквивалента дозы фотонов для *n* дозиметров не должен превышать 25% при дозе 0,1 мЗв
2	Воспроизводимость	Коэффициент вариации эквивалента дозы не должен превышать 25% для значений $H_p(10)$ менее чем 1 мЗв
3	Линейность	Отклик к нейтронам не должен изменяться более чем на 25% для эквивалентов дозы $H_p(10)$ в диапазоне от 0,1 мЗв до 1 мЗв
4	Порог детектирования	Порог детектирования не должен превышать эквивалент дозы 0,1 мЗв
5	Фединг (стабильность последней информации)	Не применимо
6	Старение	Пузырковые дозиметры не должны изменять отклик более чем на 25% в течение 3 месяцев, если используются ежедневно в неактивном состоянии функции «сброс»
7	Остаточный сигнал	После облучения до 1 мЗв и после процедуры сброса ни один пузырь не должен присутствовать в дозиметре
8	Самооблучение	Не применимо
9	Облучение другим излучением, кроме нейтронов	Не применимо
10	Стабильность к разным климатическим условиям	Отклик не должен изменяться более чем на 25 % для температур в диапазоне от 20 °С до 40 °С
11	Влияние света (непрозрачность)	Не применимо
12	Физическое повреждение	Падение с высоты 1 м не должны вызывать появление более четырех пузырьков
13	Энергетическая зависимость отклика	Отклик не должен изменяться более чем на 25% при облучении моноэнергетическими нейтронами (по ISO 8529-1) в диапазоне энергий, указанного для дозиметра
14	Угловая зависимость отклика	Среднее арифметическое значение отклика дозиметра при углах падения 0°, 15°, 45° и 60° от нормали не должно отличаться более чем на 30% от отклика при нормальном падении. Индивидуальный эквивалент дозы должны быть таким, чтобы в дозиметре образовалось по крайней мере 100 пузырьков

***Таблица П3.6** - Требования к характеристикам дозиметров с прямым хранением ионов (DIS)*

№	Характеристика	Требование к характеристике
1	Однородность партии	Коэффициент вариации эквивалента дозы фотонов для *n* дозиметров не должен превышать 20%
2	Воспроизводимость	Коэффициент вариации эквивалента дозы фотонов для *n* дозиметров не должен превышать 20% для каждого отдельного дозиметра при его облучении в десять раз
3	Линейность	Отклик не должен изменяться более чем на 10%, когда дозиметры облучаются нейтронами и фотонами, производящими отклики, соответствующие эквивалентам дозы фотонов между 1 мЗв и 100 мЗв
4	Порог детектирования	Порог детектирования не должен превышать эквивалент дозы фотонов 0,3 мЗв
5	Фединг (стабильность последней информации)	Отклик дозиметров, облученных в начале периода хранения, не должен отличаться более чем на 10% через 90 дней хранения при стандарных условиях испытаний
6	Старение	Отклик дозиметров, облученных в конце периода хранения, не должен изменяться более чем на 10% в течение периода хранения 90-дневного при стандартных условиях испытаний
7	Остаточный сигнал	Не применимо
8	Самооблучение	Не применимо
9	Облучение другим излучением кроме нейтронов	Среднее арифметическое показаний $H_p(10)$ для смешанного облучения эквивалентом дозы нейтронов 1–2 мЗв и эквивалентом дозы гамма-излучения Cs-137 до 3 мЗв не должно отличаться более чем на 20% от среднего арифметического показаний дозиметров, не подвергавшихся облучению гамма-излучением
10	Стабильность к разным климатическим условиям	Эквивалент дозы фотонов не должен отличаться от условно истинного значения более чем на 10% после 48-часового хранения при 40 °С и 90% относительной влажность при облучении дозиметров либо в начале или в конце периода хранения
11	Влияние света (непрозрачность)	Не применимо
12	Физическое повреждение	Не применимо
13	Энергетическая зависимость отклика	Отклик при нормальном падении в заявленном диапазоне энергий не должен отличаться более чем на ±50% для $H_p(10)$ меньше 1 мЗв
14	Угловая зависимость отклика	Среднее арифметическое значение отклика дозиметра при углах падения 0°, 15 °, 45° и 60° от нормали не должно отличаться более чем на 30% от соответствующего отклика при нормальном падении. Индивидуальный эквивалент дозы должен быть не менее 1 мЗв

В стандарте приведены принципы регистрации нейтронов вышеуказанными дозиметрами, методики испытаний дозиметров на соответствие вышеприведенным требованиям и интерпретации результатов испытаний. В приложениях к стандарту приведены переходные коэффициенты от флюенса нейтронов к индивидуальному эквиваленту дозы $H_p(10)$ для разных углов падения широкого пучка моноэнергетических нейтронов и нейтронов радионуклидных источников на фантом ИСО, на котором расположен дозиметр.

Приложение 4 (информационное). Основные методы дозиметрии нейтронов

В данном Приложении рассматриваются только рутинные и распространенные методы дозиметрии нейтронов, применяемые в исследовательских задачах и эталонах методы регистрации. Такие, как тканеэквивалентные пропорциональные счетчики и рекомбинационные камеры, здесь не обсуждаются. Также не обсуждается применение методов индивидуальной дозиметрии для дозиметрии на рабочих местах.

Методы дозиметрии нейтронов на рабочих местах и контроль радиационной обстановки в составе систем радиационного контроля

Типичный прибор для контроля рабочих мест состоит из:

– детектора тепловых нейтронов (BF^3, He^3, Li^6 детекторы);

– полиэтиленового замедлителя (обычно сферического для обеспечения изотропии чувствительности детектора) для замедления внешних быстрых нейтронов до тепловых энергий;

– перфорированного кадмиевого или борного экрана для приведения энергетической зависимости отклика прибора к энергетической зависимости коэффициента качества нейтронов;

– пульта с блоком питания и индикатором.

Для обеспечения приемлемой зависимости чувствительности прибора от энергии нейтронов замедлитель должен иметь определенный размер. В монографии В.И.Иванова «Курс дозиметрии» показано, что концентрация тепловых нейтронов будет постоянной и не зависящей от энергии нейтронов, создающих одинаковую дозу, только на глубине 15 см парафина.

В Руководстве по безопасности МАГАТЭ «Оценка профессионального облучения от внешних источников ионизирующего излучения» RS-G-1.3, заменяемом сейчас руководством Occupational Radiation Protection, Draft Safety Guide DS453, также указано, что дозиметр нейтронного излучения, имеющий чувствительность, не зависящую от энергии нейтронов до 10 мэВ, должен иметь сферический замедлитель из полиэтилена диаметром от 20 см, а также кадмиевый экран, экранирующий детектор от внешних тепловых нейтронов.

Дозиметры нейтронов таких конструкций применяются как переносные приборы для контроля рабочих мест и как стационарные приборы для непрерывного контроля радиационной обстановки в составе систем радиационного контроля. Имеющие тонкие и легкие замедлители дозиметры нейтронов не являются дозиметрами во всем диапазоне энергии нейтронов (от тепловых до 20 мэВ), а, как указывается в их эксплуатационной документации, предназначены для измерения мощности дозы в поле нейтронов определенного спектра, на котором проводилась их градуировка, обычно источников *Ри-Be* или ^{252}Cf в коллиматоре.

Методы индивидуальной дозиметрии нейтронов

Индивидуальные дозиметры нейтронов, применяемые в настоящее время в мире, относятся к следующим типам дозиметров:

- дозиметры с ядерными фотоэмульсиями;
- термолюминесцентные альбедные дозиметры;
- трековые дозиметры;
- пузырьковые дозиметры;
- дозиметры с прямым хранением ионов (DIS);
- электронные прямопоказывающие дозиметры.

Необходимо отметить, что из всех типов дозиметров наибольшее распространение получают те, которые наиболее удобны, технологичны и дешевы в производстве и применении. В России из вышеуказанных типов дозиметров наиболее часто используются ТЛД и электронные дозиметры, пузырьковые и DIS дозиметры используются буквально на нескольких предприятиях.

Дозиметры с ядерными фотоэмульсиями

Ядерные фотоэмульсии используются в индивидуальной дозиметрии быстрых нейтронов. Нейтроны взаимодействуют с ядрами водорода в эмульсии и окружающих материалах и создают протоны отдачи. При прохождении протонов через эмульсию образуется скрытое изображение треков, выявляемое путем химического проявления. Для счета треков в эмульсии используется микроскоп с увеличением порядка 1000. Счет треков может быть облегчен при совмещении микроскопа с телевизионной камерой и монитором. Погрешность измерения дозы зависит от опыта лаборанта.

Энергетический порог регистрации быстрых нейтронов ядерными фотоэмульсиями составляет около 0,7 МэВ. Тепловые и промежуточные нейтроны могут регистрироваться по реакции $^{14}N(n,p)^{14}C$ с ядрами азота фотоэмульсии, однако треки протонов от этой реакции очень малы, что приводит к большой погрешности измерения.

Серьезной проблемой при использовании ядерных фотоэмульсий является их чувствительность к фотонам, что приводит к почернению эмульсии после проявления и к усложнению задачи выявления и счета треков. Наибольшие проблемы бывают на высокоэнергетических ускорителях, где из-за высокой чувствительности к тяжелым заряженным частицам (протоны, пионы, мюоны) ядерные фотоэмульсии могут значительно завышать дозу нейтронов.

Метод достаточно хорошо отработан в рабочих условиях, сравнительно прост в эксплуатации, легко внедряется. И, несмотря на отмеченные недостатки, в течение 30 и более лет используется в качестве основного метода индивидуального контроля облучаемости персонала нейтронами в ИФВЭ (Протвино), ОИЯИ (Дубна), ИТЭФ (Москва) и др.

Термолюминесцентные альбедные дозиметры

Альбедные индивидуальные дозиметры нейтронов основаны на использовании замедляющих свойств человеческого тела. Любой детектор тепловых нейтронов, помещенный на поверхности тела, может служить альбедо-дозиметром. В альбедо-дозиметрах обычно применяют термолюминесцентные детекторы ^{6}LiF в борных или кадмиевых фильтрах для разделения падающих на тело и альбедных тепловых нейтронов. Вследствие чувствительности детекторов ^{6}LiF к фотонам доза нейтронов определяется по разности показаний ТЛД ^{6}LiF и ^{7}LiF.

Разработанные до настоящего времени альбедо-дозиметры имеют высокую и приблизительно постоянную чувствительность к нейтронам в диапазоне энергий от тепловой до 10 кэВ. Чувствительность, однако, резко падает при энергиях выше 10 кэВ. Чувствительность может изменяться в диапазоне до 20 раз в полях рассеянного излучения.

Широкому внедрению этих дозиметров способствовала разработка методики калибровки альбедных дозиметров на местах работы персонала, что позволило значительно снизить неопределенность измерения дозы нейтронов, обусловленную зависимостью чувствительности дозиметров от энергии излучения.

Перспективным индивидуальным дозиметром нейтронов является разработанный в ИФВЭ с учетом современных международных и отечественных рекомендаций альбедный дозиметр на основе ТЛД ^{6}LiF – ^{7}LiF. Дозиметр имеет повышенную чувствительность к быстрым нейтронам за счет применения полиэтиленового замедлителя. Полная толщина тканеэквивалентного вещества над ТЛД составляет 1 г/см^2, что позволяет измерять индивидуальную эквивалентную дозу фотонов и заряженных частиц $H_p(10)$ с помощью ТЛД ^{7}LiF без использования дополнительных детекторов с высокой точностью. Данная разработка реализована в АКИДК-301, разработанном совместно АЭХК (Ангарск) и ИФВЭ, и в комплексе «Доза-ТЛД».

Твердотельные трековые детекторы (ТТД)

Сильно ионизирующие частицы, такие, как осколки деления, альфа-частицы и протоны создают структурные повреждения в различных материалах, например, в минералах, стеклах и пластиках. Путем химического травления поверхности детектора специально подобранными реагентами зона повреждения вдоль трека частицы может быть удалена и трек увеличен до размеров, видимых в оптический микроскоп. Применение электрохимического травления позволяет добиться дополнительного многократного увеличения размеров трека, что значительно облегчает счет треков с помощью микроскопа с малым увеличением (>20). В случае применения пленочных полимерных детекторов (полиэтилентерефталатных, поликарбонатных, нитратцеллюлозных) удобно применять электроискровой способ автоматического счета треков. ТТД практически не чувствительны к гамма-излучению.

Размеры и форма проявленных треков зависят от типа, энергии и угла падения частицы, материала детектора и условий травления (концентрация и температура травящего раствора, время травления). Эти параметры оптимизируются для каждого материала и условий применения.

В индивидуальной дозиметрии нейтронов в настоящее время используются три основных типа детекторов на основе ТТД:

Детекторы осколков деления

При облучении нейтронами радиатор из делящегося материала испускает осколки деления, которые регистрируются с помощью ТТД. В зависимости от нуклида реакции деления либо имеют пороговый характер (0,6 МэВ для ^{237}Np; 1,3 МэВ для ^{232}Th; 1,5 МэВ для ^{238}U), либо очень большое сечение на тепловых нейтронах (^{235}U). Применение делящихся материалов в индивидуальных дозиметрах в настоящее время ограничено или запрещено в некоторых странах из-за их радиоактивности. Однако применяя особо чистые изотопы, например, уран-235 (99,9%), или нуклиды с низкой удельной активностью, например, торий-232, возможно создание дозиметров с активностью много меньше МЗА. Детектор на основе урана-235 может использоваться в качестве альбедного.

Дозиметр данного типа на основе особо чистого (99,9%) ^{235}U и комплекс АИСТ-ТРАЛ, разработанный НПО РИ (Санкт-Петербург), используется в течение ряда лет на предприятиях «ПО «Маяк», СХК, ГХК. Перспективы его широкого применения ограничены из-за наличия в дозиметре радиоактивных и высокотоксичных веществ.

Детекторы альфа-частиц

Нейтроны взаимодействуют с ядрами ^{6}Li или ^{10}B во внешнем радиаторе. Альфа-частицы, образованные в (*n*-альфа)-реакциях, имеют энергии около 2,5 МэВ и 1,5 МэВ, соответственно, для нейтронов ниже нескольких сотен кэВ. Сечения реакций очень велики на тепловых нейтронах и падают по закону 1/v с ростом энергии нейтронов. Большинство коммерчески доступных пластиковых ТТД могут регистрировать испускаемые альфа-частицы. Эффективность регистрации зависит от типа ТТД и условий травления. Основное ограничение в применении этого подхода – высокие собственный фон детектора и его вариация для альфа-чувствительных ТТД.

Детекторы ядер отдачи

Упругое рассеяние нейтронов на ядрах пластиковых ТТД (CR-39, Macrofol, LR-115) приводит к образованию ядер отдачи, таких, как протоны, ядра углерода, кислорода и азота. Эти ядра отдачи образуют скрытые треки, проявляемые путем травления ТТД. Для увеличения треков используется химическое или электрохимическое травление, либо их комбинация.

Различные типы пластиков имеют разные чувствительности к нейтронам, а также энергетические зависимости чувствительности. Наиболее перспективными являются ТТД типа CR-39, имеющие высокую чувствительность и низкий порог регистрации нейтронов. Недостатки этих детекторов – большая угловая зависимость чувствительности и нестабильные характеристики, особенно трековый фон, зависящий от содержания радона в помещении.

Пузырьковые дозиметры

Коммерчески доступные пузырьковые детекторы являются новым типом прямопоказывающего дозиметра нейтронов. Эти детекторы представляют собой упругий полимер с внедренными в него каплями перегретой жидкости. Выделение небольшой энергии в перегретой жидкости при образовании ядер отдачи приводит к появлению пузырьков пара, видимых невооруженным глазом. Плотность пузырьков пропорциональна дозе нейтронов. Этот детектор является полностью пассивным прибором, который может храниться долгое время перед использованием. Разработан также автоматический считыватель под управлением компьютера, который может обсчитывать большое количество детекторов.

Детектор имеет очень высокую чувствительность к нейтронам (до нескольких мкЗв) и абсолютно нечувствителен к фотонам. Могут изготавливаться детекторы с различными энергетическими порогами от 100 кэВ до нескольких МэВ, так что набор пузырьковых детекторов может применяться для спектрометрии нейтронов. Эти детекторы, однако, имеют большую зависимость от температуры окружающей среды. Кроме того, их диапазоны измерений по энергии нейтронов и дозе ограничены, поэтому для перекрытия необходимого в индивидуальной дозиметрии диапазона необходимо использовать одновременно несколько детекторов с различными характеристиками.

Дозиметры с прямым хранением ионов (DIS)

Дозиметр DIS имеет несколько измерительных камер, среди которых ионизационные камеры с прямым хранением ионов и МОП-транзисторы.

Наличие нескольких детекторов имеет то преимущество, что дозиметры имеют очень широкий диапазон измерения дозы (от 1 мкЗв до 40 Зв) и могут измерять разные дозы: $H_p(10)$, $H_p(0,07)$ и $H_p(3)$.

Значения дозы с дозиметров DIS можно считывать с помощью устройства считывания. Для получения значения последней измеренной дозы $H_p(10)$, $H_p(0,07)$ или $H_p(3)$

нужно подключить дозиметр к считывателю, и значения дозы отображаются на дисплее считывателя в течение нескольких секунд. Считыватель может работать как в автономном режиме, когда только отображает дозы, так и в составе системы с передачей данных в компьютер.

Дозиметры DIS сочетают преимущества пассивных учетных дозиметров для текущего ИДК с возможностью фиксировать накопленные дозы сразу после проведения определенной работы.

Электронные прямопоказывающие дозиметры

Электронные прямопоказывающие дозиметры обеспечивают обработку информации с детекторов и представление результатов измерения дозы и мощности дозы на прямопоказывающие цифровые табло в реальном времени, а также сигнализацию о превышении заданных значений дозы и мощности дозы.

В качестве детектора нейтронов в них применяются полупроводниковые поверхностно-барьерные детекторы с радиаторами из водородсодержащих материалов и/или содержащими ^{6}Li или ^{10}B. Регистрация быстрых нейтронов (свыше 0,5 МэВ) осуществляется по протонам отдачи, тепловых нейтронов – по продуктам реакции на Li или B.

При оптимальном выборе толщины радиаторов и чувствительного слоя ППД нижняя граница измерения дозы нейтронов оценивается в 0,1–10 мкЗв, мощность дозы 1–50 мкЗв/ч.

Серьезной проблемой применения дозиметров нейтронов с ППД является их чувствительность к фотонному излучению. Для устранения этого недостатка приходится усложнять дозиметр, вводя дополнительные детекторы для раздельной регистрации фотонов.

Приложение 5 (информационное)
Дозиметрия импульсного нейтронного излучения электронными дозиметрами

П5.1. К физическим характеристикам нейтронного излучения кроме энергетического и углового распределения также относится и временная характеристика. Нейтронное излучение, как и любое другое излучение, может быть непрерывным или импульсным. Дозиметрия импульсного излучения с применением накопительных, например, термолюминесцентных дозиметров не представляет сложности. Но при небольших средних значениях мощности дозы в полях импульсных излучений значения мощности дозы в импульсах могут существенно превышать измерительные возможности электронных дозиметров. Поэтому обсуждаемые ниже проблемы дозиметрии импульсных излучений касаются электронных дозиметров для контроля рабочих мест и электронных индивидуальных дозиметров.

П5.2. Особенности дозиметрии импульсного нейтронного излучения электронными дозиметрами.

В стандарте МЭК 62743 «Электронные счетные дозиметры для импульсных полей ионизирующего излучения» даны определения временных характеристик излучений:

Импульсное излучение

Применительно к дозиметрии рабочих мест и индивидуальной дозиметрии – ионизирующее излучение, в котором в данной точке пространства никогда не будет постоянной мощности дозы в течение интервала времени больше чем 10 с;

Непрерывное излучение

Применительно к дозиметрии рабочих мест и индивидуальной дозиметрии – ионизирующее излучение с постоянной мощностью дозы в данной точке пространства в

течение интервала времени больше чем 10 с, если пренебречь временами включения и выключения поля.

Примечания в определениях *применительно к дозиметрии рабочих мест и индивидуальной дозиметрии* приведены в связи с тем, что интервал времени 10 с взят из требований стандартов по дозиметрам нейтронов МЭК 61005, 61322 и стандарта по индивидуальным дозиметрам МЭК 61526 о том, что электронные дозиметры должны регистрировать существенные изменения мощности дозы в течение 10 сек.

Основными характеристиками импульсных излучений являются следующие параметры:

– максимальная мощность дозы в импульсе на рабочем месте;

– максимальная доза в импульсе на рабочем месте;

– минимальная длительность импульса на рабочем месте;

– диапазон частот импульсов на рабочем месте.

П5.3. В технической спецификации ISO/TS 18090-1:2015 приведены характеристики эталонных импульсных излучений. На Рисунке П5.1 приведены характеристики импульса излучения из данной технической спецификации. Здесь длительность импульса излучения t_{pulse} означает промежуток времени между первым и последним моментами, когда значение мощности кермы в воздухе в импульсе достигает 50% от его максимального значения.

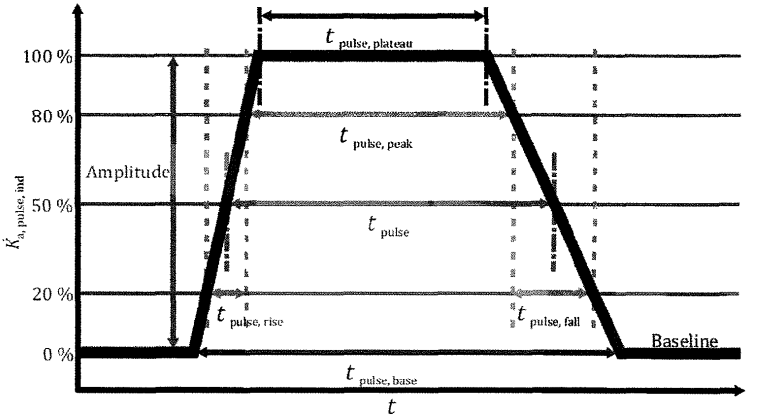


***Рисунок П5.1** - Импульс излучения с соответствующими параметрами (из стандарта ИСО 18090-1 по эталонным импульсным излучениям)*

П5.4. Основными значимыми характеристиками дозиметра для его применения в дозиметрии импульсного излучения являются следующие характеристики импульсного излучения, при которых дозиметр сохраняет измерительные возможности:

– максимальная мощность дозы в импульсе;

– максимальная доза в импульсе;

– минимальная длительность импульса;

– диапазон частот импульсов.

П5.5. Импульсы излучения нейтронных генераторов имеют длительности от 0,01 мкс до 10 мс при частоте повторения импульсов от одиночных до 10 кГц. Самым сложным случаем дозиметрии импульсного излучения является дозиметрия отдельного импульса. Успешное применение электронного дозиметра для повторяющихся импульсов будет сложнее, чем для непрерывного излучения, но проще, чем для отдельного импульса, так что необходимые характеристики дозиметра для импульсных излучений будут средними между этими двумя крайними случаями.

П5.6. Операционной величиной в дозиметрии внешнего облучения импульсными излучениями является амбиентный эквивалент дозы. Мощность дозы является производной величиной от дозы облучения и вычисляется делением измеренного значения дозы на время измерения. Мощность дозы используется как характеристика радиационной обстановки только для непрерывных излучений, так как радиационную обстановку, создаваемую импульсами излучения длительностями микро- или миллисекунды, трудно характеризовать значением дозы, приведенным на час. Операционные величины для импульсных излучений при мониторинге среды приведены в Таблице П5.1.

***Таблица П5.1** - Операционные величины для импульсных излучений при мониторинге среды*

Нормируемая величина	Операционная величина	Условное обозначение
Эффективная доза внешнего облучения	Амбиентный эквивалент дозы	*H*(10)*
Эквивалентная доза хрусталика глаза	Направленный эквивалент дозы	*H'(3)*
Эквивалентная доза внешнего облучения кожи, кистей и стоп	Направленный эквивалент дозы	*H'(0,07)*

П5.7. Таким образом, измеряемой характеристикой радиационной обстановки на рабочем месте в дозиметрии импульсных излучений является доза облучения. В связи с тем, что источники импульсных излучений не работают круглосуточно, для расчета нормируемой величины (эффективной/эквивалентной дозы облучения за год) необходимы параметры работы источников, на которые можно нормировать измеренные значения дозы. Параметром работы источника импульсного ионизирующего излучения является характеристика работы источника, к значению которой прямо пропорционально значение дозы излучения.

Например, параметром работы нейтронных генераторов служит число импульсов излучения. Доза от излучения генератора пропорциональна числу импульсов излучения генератора. При отсутствии импульсов излучения отсутствует и доза. Отношение операционной величины, дозы в интересующей нас точке, к числу импульсов излучения генератора при выработке измеренного значения дозы является величиной, характеризующей радиационные свойства генератора, и оно постоянно для данного напряжения на трубке конкретного генератора. Произведение значения данного отношения на рабочем месте персонала на число импульсов излучения, генерированных источником за год, будет оценкой дозы облучения персонала в течение года.

Возможны другие типы источников импульсных излучений нейтронов, в которых доза излучения пропорциональна к другим параметрам источника. Необходимо установление причинно-следственной связи между операционной величиной, дозой излучения и параметром работы источника, которая позволит построить модель перехода от операционной величины к нормируемой величине для конкретного типа источника импульсного излучения.

Приложение 6 (справочное)
Основные факторы, влияющие на результаты дозиметрии нейтронов

Данное приложение к МУ содержит анализ основных влияющих величин и экспериментальные и теоретические методы оценки поправок для различных влияющих факторов.

В связи с тем, что значимость влияющих факторов зависит от метода измерения, необходимо рассмотреть типы индивидуальных дозиметров, применяемых в нейтронной дозиметрии, вместе со значимыми влияющими факторами для данного типа дозиметров.

П6.1. Допустимые средства измерений

П6.1.1. Все средства измерений индивидуального эквивалента дозы (ИЭД) нейтронного излучения, используемые для целей ИДК при облучении нейтронным излучением, должны быть занесены в Государственный Реестр средств измерений и иметь действующие свидетельства о поверке.

П6.1.2. Дозиметры, которые могут использоваться для ИДК при облучении нейтронным излучением, и их некоторые информативные и эксплуатационные характеристики приведены в Таблице П6.1. Знак «+» означает, что данная **функция реализуется**, знак «–» **не реализуется**, «±» **реализуется частично или реализация зависит от комплектации**.

Таблица П6.1 *- Дозиметры, которые могут использоваться для ИДК при облучении нейтронным излучением, и их некоторые информативные и эксплуатационные характеристики*

Характеристика	**Дозиметр**					
	ДВГН-01	**RADOS**[1)]	**Кордон-2**	**BD-PDN**	**ДВС-01С**	**DMC 2000 GN**
Номер в Государственном Реестре СИ[2)]	54824-13 51124-12	44294-10	20877-01	24331-03	33386-06	54619-13
Изготовитель (поставщик)	ФГУП АЭХК, НПП «Доза»	ЗАО «Приборы»	НТЦ «РИОН»	Фирма «Bubble Technology Industries», Канада	ООО «РАДКОН»	Компания «MIRION T-gies (MGPI) SA», Франция
Метод измерения	Термолюминесцентный		Трековый	Пузырьковый	Полупроводниковый	
Считывающее устройство	Пульты АКИДК-301, Доза – ТЛД	Пульт RADOS	Считывающее устройство АИСТ-2В	Визуально или устройство считывания BDR-III	Встроенный дисплей, возможна передача информации на ПЭВМ	
Одновременное измерение гамма-излучения	+	±	–	–	+	+
Возможность использования в импульсных полях излучений	+	+	+	+	–	–

Характеристика	Дозиметр					
	ДВГН-01	RADOS[1)]	Кордон-2	BD-PDN	ДВС-01С	DMC 2000 GN
Сигнализация о превышении порогов: - по дозе - по мощности дозы	– –	–	–	–	+ +	+ +

[1)] – *Дозиметры должны иметь специальную кассету для измерений нейтронного излучения.*

[2)] – *Сертификат об утверждении типа средства измерений выдается на 5 лет. Две последние цифры в номере означают год утверждения типа средства измерений. Через каждые 5 лет должны проходить испытания на соответствие утвержденному типу средства измерений, при этом продлевается срок действия Сертификата. Если срок действия Сертификата истек, то изготовитель не имеет право поставлять средства измерений для эксплуатации. Средства измерений, выпущенные в период действия Сертификата, могут находиться в эксплуатации и подвергаться поверке без ограничения срока.*

П6.1.3. Основные метрологические и технические характеристики дозиметров приведены в Таблице П6.2.

Таблица П6.2 *- Основные метрологические и технические характеристики дозиметров*

Техническая характеристика	Дозиметр					
	ДВГН-01	RADOS	Кордон-2	BD-PDN	ДВС-01С	DMC 2000 GN
Диапазон измерений ИЭД нейтронного излучения, мЗв	0,005–10000	0,005–10000	0,05–5000	0–0,05/S при визуальном подсчете, где S – чувствительность, мЗв$^{-1}$; 0–3,5/S при подсчете со считывающим устройством	0,02–1,5·10^7	0,02–10000
Диапазон измерений ИЭД гамма-излучения, мЗв	0,005–10000	0,005–10000	–	–	0,001–1,5·10^7	0,001–10000
Пределы допускаемой основной относительной погрешности измерения ИЭД нейтронного излучения, %	±15[1)]	±15[1)]	+250/–90 при ИЭД 0,05 мЗв; ±60 при ИЭД 0,5 мЗв; ±30 при ИЭД более 5 мЗв	±15× ×(1+200/$\sqrt{N}$), где N – количество пузырьков	±(20+ +2000/H_n), где H_n – измеренное значение ИЭД в мкЗв	±(20+ +2000/H_n), где H_n – измеренное значение ИЭД в мкЗв

Техническая характеристика	Дозиметр					
	ДВГН-01	RADOS	Кордон-2	BD-PDN	ДВС-01С	DMC 2000 GN
Пределы допускаемой основной относительной погрешности измерения ИЭД гамма-излучения, %	±15	±15	–	–	±20	±20
Диапазон регистрируемых энергий нейтронов, МэВ	$2{,}5\cdot10^{-8}$–20	$2{,}5\cdot10^{-8}$–20	$4\cdot10^{-7}$–15	0,3–15	$2{,}5\cdot10^{-8}$–20	$2{,}5\cdot10^{-8}$–15[3)]
Диапазон регистрируемых энергий гамма-излучения, МэВ	0,015–6	0,015–6	–	–	0,05–6	0,06–6
Энергетическая зависимость чувствительности для набора типовых спектров нейтронов[2)], %	±50	±50	±30	±30	От минус 50 до +80	От минус 50 до +80
Энергетическая зависимость чувствительности для гамма-излучения, %	±15	±15	–	–	±35	±20
Анизотропия чувствительности для углов от 0 до 60 градусов	±15	±15	±15	±5	±30	±30
Диапазон рабочих температур, °С	От минус 35 до +60	От минус 35 до +60	От минус 10 до +40	От +20 до +37	От минус 20 до +40	От минус 10 до +50
Пределы допускаемой дополнительной погрешности за счет изменения температуры в рабочем диапазоне температур	±10	±10	±10	±15	±8 на каждые 10 °С	±8 на каждые 10 °С
Масса, кг	0,055	0,015	0,02	0,058	0,1	0,08
Габаритные размеры, мм	130×40×21	42×46×9	Ø40×10	Ø19×146	97×48×32 (с клипсой)	86,5×48×32 (с клипсой)

[1)] *детекторы, входящие в дозиметр, должны иметь индивидуальную градуировку.*

[2)] *градуировка дозиметра осуществляется в поле Ри-Ве источника, размещенного в установке УКПН.*

[3)] *дозиметр имеет значительный подъем чувствительности при увеличении энергии.*

П6.2. Условия измерений и влияющие величины

П6.2.1. Контроль условий измерений проводится с целью оценки значений влияющих величин, имеющих место при отклонении условий измерений от условий, в которых проводится градуировка и поверка средств измерений (нормальных условий).

Значения основных влияющих величин в нормальных условиях при градуировке и поверке нейтронных индивидуальных дозиметров приведены в Таблице П6.3. При этом для определенных типов дозиметров существенными могут быть только определенные влияющие величины из тех, которые указаны в Таблице П6.2.

***Таблица П6.3** - Значения основных влияющих величин в нормальных условиях при градуировке и поверке нейтронных индивидуальных дозиметров*

Влияющая величина	Стандартные значения (если иные не указаны изготовителем)	Нормальные условия (если иные не указаны изготовителем)
1	2	3
Энергия нейтронов	Спектр нейтронов Pu-Be источника, размещенного в контейнере-коллиматоре установки УКПН	Спектр нейтронов Pu-Be источника, размещенного в контейнере-коллиматоре установки УКПН
Направление излучения	Направление, указанное в РЭ	Направление, указанное в РЭ
Собственный фон	Незначительный	Незначительный в соответствии с РЭ
Вид поля излучения (непрерывное, импульсное)	Непрерывное (стационарное)	Непрерывное (стационарное)
Мощность дозы	В соответствии с РЭ	В соответствии с РЭ
Положение дозиметра на фантоме при градуировке и поверке	Вплотную к поверхности фантома	Вплотную к поверхности фантома
Материал фантома	Тканеэквивалентное вещество	Тканеэквивалентное вещество
Вклад в дозу от сопутствующего гамма-излучения, %	2	≤ 5
Температура окружающей среды, °С	20	18–22
Атмосферное давление, кПа	101,3	86–106
Относительная влажность, %	65	50–65
Напряжение питания	В соответствии с РЭ	В соответствии с РЭ
Фоновое излучение, мкЗв/ч	0,2	≤ 0,2

1	2	3
Электромагнитное поле внешнего происхождения	Незначительное	Меньше минимального значения, вызывающего возмущение
Электрический разряд	Отсутствует	Отсутствует
Ударные нагрузки	Отсутствуют	Меньше минимального значения, вызывающего возмущение
Освещенность, $Вт \cdot м^{-2}$	50	≤ 100 (в соответствии с РЭ)
Загрязнение радиоактивными элементами	Незначительное	Незначительное в соответствии с РЭ

Влияющие величины целесообразно сгруппировать в два класса: влияющие величины при измерении индивидуального эквивалента дозы и влияющие величины при измерении эффективной дозы (при переходе от значений индивидуального эквивалента дозы к значениям эффективной дозы).

Перечень основных влияющих величин для индивидуальных дозиметров при измерении индивидуального эквивалента дозы нейтронного излучения приведен в Таблице П6.4, где знаком «–» отмечены влияющие факторы (величины), которыми **можно пренебречь** при использовании определенных дозиметров; знаком «+» отмечены влияющие факторы (величины), которые **следует рассматривать** при использовании дозиметров; знаком «++» отмечены влияющие факторы (величины), которые **являются критическими характеристиками** и могут значительно повлиять на значение измеряемой величины при использовании определенных дозиметров.

***Таблица П6.4** - Перечень основных влияющих величин для индивидуальных дозиметров при измерении индивидуального эквивалента дозы нейтронного излучения*

Влияющая величина	Дозиметр					
	ДВГН-01	RADOS	Кордон-2	BD-PDN	ДВС-01С	DMC 2000 GN
1	2	3	4	5	6	7
Диапазон, линейность (постоянство чувствительности по диапазону)	+	+	+	+	+	+
Собственный фон	+	+	+	+	+	+
Энергетическая зависимость чувствительности	++	++	++	++	++	++
Чувствительность к сопутствующим излучениям	++	++	–	–	++	++
Анизотропия чувствительности	+	+	+	–	+	+
Зависимость чувствительности от мощности дозы	–	–	–	–	++	++
Сходимость измерений	++	++	+	+	+	+

1	2	3	4	5	6	7
Сохранность накопленной информации (дозы)	++	++	+	+	+	+
Освещенность	++	++	–	–	–	–
Ударное воздействие	+	+	–	++	++	++
Температура окружающей среды	+	+	+	++	+	+
Электромагнитные поля	–	–	–	–	++	++
Электрический разряд (электростатические пробои)	–	–	–	–	+	+
Положение дозиметра на теле	++	++	++	++	++	++

Возможность и необходимость введения поправочных коэффициентов, учитывающих влияние определенных факторов (влияющих величин), и следовательно уменьшения неопределенности значения измерения индивидуального эквивалента дозы и эффективной дозы, можно установить в результате их анализа, теоретических оценок и экспериментальных исследований.

Если поправочный коэффициент не вводится, то неопределенность за счет конкретной влияющей величины берут из руководства по эксплуатации или в случае отсутствия в руководстве по эксплуатации из НТД на общие технические требования.

В тех случаях, когда влияющая величина не приводит к заметному изменению измеряемой величины, поправочный коэффициент принимается равным единице, а неопределенность за счет данной влияющей величины считают равной нулю.

Теоретические оценки и экспериментальные исследования отдельных влияющих факторов требует использования фантома.

Зависимость характеристик фантомов от некоторых параметров: материал, форма и размер, а также взаимное влияние дозиметров друг на друга при размещении нескольких дозиметров на фантоме рассмотрены в **Дополнении А** к Приложению 6 настоящих МУ.

П6.2.2. Основные влияющие величины, которые должны рассматриваться в МИ для конкретных предприятий

Постоянство чувствительности (линейность) в диапазоне измерения

Изменение чувствительности дозиметра в диапазоне измерения входит как составляющая основной погрешности дозиметра. Поэтому, если основная погрешность не выходит за установленные пределы, можно считать, что изменение чувствительности по диапазону измерения находится в допустимых пределах.

В широкодиапазонных дозиметрах, в зависимости от типа дозиметра и используемого метода измерений, следует рассматривать различные факторы, которые могут привести к изменению чувствительности и, следовательно, к возникновению дополнительной неопределенности результата измерений:

– наличие нескольких детекторов (чувствительного и грубого, автоматически включаемых при определенных значениях мощности дозы) для расширения рабочего диапазона мощности дозы, при которой измеряется индивидуальный эквивалент дозы (обычно используется в полупроводниковом методе измерения);

– изменение коэффициентов линеаризации, вводимых для учета просчетов (характерно для полупроводникового метода измерений);

– изменение чувствительности считывателя при измерении больших значений индивидуального эквивалента дозы (характерно для ТЛД систем);

– возникновение просчетов при считывании информации (характерно для пузырькового и трекового метода измерений);

– изменения положения детекторов относительно других конструктивных элементов, радиаторов и фильтров, возникающие в процессе эксплуатации.

Собственный фон

Собственный фон дозиметра исключается при вычитании из результата измерения суммарного фона, однако в тех случаях, когда есть предположения о существенном и изменяющемся в реальных условиях собственном фоне дозиметра, следует проанализировать факторы, оказывающие влияние на собственный фон, и ввести соответствующую поправку на результат измерения.

Определение собственного фона дозиметра является сложной задачей. Оценкой значения собственного фона дозиметра может служить разность значения суммарного фона дозиметра и значения фона, полученного с помощью дозиметров, основанных на различных методах измерений, которым присущ минимальный собственный фон.

Собственный фон, оцененный в нормальных условиях (в которых обычно проводится градуировка и поверка дозиметра), может существенно отличаться от собственного фона дозиметра в реальных условиях измерений и исказить результат измерений, в особенности при малых значениях индивидуальных доз.

При этом на значение собственного фона, как и на результат измерения индивидуального эквивалента дозы в реальных условиях измерений, могут повлиять не только свойства, присущие дозиметру, но и не соблюдение правил хранения и применения при эксплуатации дозиметра.

Например, при использовании термолюминесцентных дозиметров для измерения малых значений индивидуальной дозы существенными могут оказаться следующие факторы:

– загрязнение детекторов;

– неравномерность нагрева детекторов;

– излучение, попадающее на ФЭУ с нагревательного элемента;

– возникновение флюриолюминесценции при воздействии повышенной освещенности;

– возникновение триболюминесценции при механическом воздействии на детекторы (например, сильное сжатие детектора пинцетом при загрузке в считыватель);

– возникновение хемилюминесценции при взаимодействии с окружающей средой;

– повышенная температура и влажность;

– возникновение дополнительных ловушек за счет нарушений в структуре детектора, возникающих, в частности, при взаимодействии нейтронов с ядрами вещества детектора и радиатора;

– недостаточный отжиг детекторов;

– и др.

Энергетическая зависимость чувствительности дозиметров

Как правило, в руководствах по эксплуатации приводятся границы неопределенности за счет энергетической зависимости чувствительности дозиметра.

Методы оценки энергетической зависимости чувствительности рассматриваются в **Дополнении Б** к Приложению 6 настоящих МУ.

Чувствительность к сопутствующим излучениям

Как правило, в руководствах по эксплуатации не рассматривается чувствительность дозиметра к сопутствующим излучениям.

В зависимости от конструктивных особенностей дозиметра и методах обработки измерительной информации сопутствующие излучения могут приводить как к завышению, так и к уменьшению реальных значений индивидуального эквивалента дозы.

Некоторые принципы оценки влияния сопутствующих излучений на показания дозиметра рассматриваются в **Дополнении В** к Приложению 6 настоящих МУ.

Анизотропия чувствительности дозиметров

Анизотропия чувствительности для индивидуальных дозиметров, как правило, указывается в руководстве по эксплуатации для углов в пределах ±60° либо в виде графика (зависимость чувствительности от угла падения излучения в относительных единицах), либо в виде относительного предельного отклонения значения чувствительности от ее значения для определенного направления. Когда не известно преимущественное направления падения излучения на дозиметр, при расчете неопределенности результата измерения используют предельное значение анизотропии.

Зависимость чувствительности от мощности дозы

Из перечисленных в Таблице П6.4 дозиметров зависимость чувствительности от мощности дозы свойственна основанным на полупроводниковом методе измерений дозиметрам: ДВС-01С и DMC 2000 GN. Основные причины зависимости чувствительности от мощности дозы связаны с наложением импульсов. Это приводит, с одной стороны, к просчетам (уменьшение «живого» времени измерений), с другой стороны, к образованию импульсов, которые отличаются от обычных по форме и амплитуде, и которые при наличии раздельных каналов регистрации по гамма-излучению и нейтронному излучению могут регистрироваться в канале, предназначенном для регистрации излучения другого вида.

Следует контролировать, чтобы рабочий диапазон мощности дозы не превышал пределов, указанных в руководстве по эксплуатации.

Сходимость и воспроизводимость измерений

Характеристики – сходимость и воспроизводимость измерений, как правило, не приводятся в руководстве по эксплуатации. Они является составляющими основной погрешности или стабильности, если ее значение приводится в руководстве по эксплуатации.

В процессе эксплуатации дозиметров изменяются свойства детекторов и систем сбора и обработки информации. Контроль сходимости и воспроизводимости измерений позволит обнаружить эти изменения и определить возможность дальнейшей эксплуатации дозиметров.

При использовании для целей ИДК в случаях облучения нейтронами ТЛД систем, в которых отсутствует индивидуальная градуировка ТЛ детекторов, важным параметром является однородность партии детекторов.

Сохранность накопленной информации (дозы)

Сохранность накопленной дозы является критической характеристикой только для ТЛД систем. Процедура контроля этого влияющего фактора должна соответствовать требованиям стандарта МЭК 61066.

Повышенная освещенность

Повышенная освещенность является критической характеристикой только для термолюминесцентных дозиметров. Процедура контроля этого влияющего фактора должна соответствовать требованиям стандарта МЭК 61066.

Ударное воздействие

Не допускается использование дозиметров, если ударные воздействия выходят за пределы, указанные в руководстве по эксплуатации. При наличии ударных воздействий следует смоделировать их в лабораторных условиях и определить их влияние на результат измерений.

Температура окружающей среды

Не допускается использование дозиметров, если диапазон температур выходит за пределы, указанные в руководстве по эксплуатации. Неопределенность (дополнительную погрешность) за счет отклонения рабочей температуры окружающей среды от нормальных условий берут из руководства по эксплуатации.

Электромагнитные поля

Электромагнитное поле может оказаться критической характеристикой для дозиметров, основанных на полупроводниковом методе измерений. Проверку на воздействие электромагнитного поля проводят по МЭК 62706.

Целесообразно провести проверку влияния мобильных телефонов. Для этого оценить изменения показания дозиметра при размещении мобильного телефона, находящегося в режиме «вызов», на расстоянии 10 см от дозиметра.

Электрический разряд (электростатические пробои)

Электрический разряд может оказаться критической характеристикой для дозиметров, основанных на полупроводниковом методе измерений. Электростатическое поле может возникать при трении отдельных предметов, одежды и т. д. при наличии сухой атмосферы. Проверку на воздействие электростатического пробоя проводят по МЭК 2706.

Положение дозиметра на теле

Показания дозиметров, в особенности альбедных, зависят от расстояния дозиметра от поверхности тела. Зависимость показаний дозиметров от положения дозиметра на фантоме приведена в **Дополнении Г** к Приложению 6 настоящих МУ.

Основные влияющие величины при измерении эффективной дозы нейтронного излучения (при переходе от значений индивидуального эквивалента дозы к значениям эффективной дозы), которые являются критическими характеристиками:

– энергетическая зависимость значений коэффициента перехода от индивидуального эквивалента дозы к эффективной дозе;

– угловая зависимость значений коэффициента перехода от индивидуального эквивалента дозы к эффективной дозе.

Зависимость значений коэффициента перехода от энергии нейтронов

Энергетическая зависимость значений коэффициента перехода от индивидуального эквивалента дозы к эффективной дозе рассмотрена в **Дополнении Д** к Приложению 6 настоящих МУ.

П6.3. Средства контроля отдельных критических технических характеристик используемых средств измерений

П6.3.1. Рекомендуются следующие средства для проверки и контроля отдельных критических технических характеристик:

– установка типа УКПН-1М с Pu-Be источником;

– установка типа УПГД-1 с источником Cs-137;

– источники бета-излучения ^{90}Sr – ^{90}Y, ^{106}Ru – ^{106}Rh.

П6.3.2. Технические характеристики, которые могут измениться в процессе эксплуатации за счет изменений свойств детекторов и отдельных узлов блоков детектирования средств измерений, приводящих к изменению метрологических характеристик, а также периодичность, средства и методы для контроля этих изменений в течение межповерочного интервала устанавливаются в МИ для конкретных предприятий.

П6.4. Подготовка к выполнению измерений

П6.4.1. Подготовка дозиметров к измерениям проводится в соответствии с руководством по эксплуатации.

П6.4.2. Необходимые дополнительные специальные процедуры, учитывающие реальные условия эксплуатации средств измерений, в том числе, их размещение в определенных местах на теле, указываются в МИ для конкретных предприятий.

П6.5. Выполнение измерений

П6.5.1. Выполнение измерений проводится в соответствии с руководством по эксплуатации.

П6.5.2. Процедуры и периодичность считывания показаний в зависимости от типа используемых средств измерений, процедуры контроля изменения влияющих факторов, приводящие к уменьшению неопределенности результата измерений, устанавливаются в МИ для конкретных предприятий.

Дополнение А (справочное) к Приложению 6 Характеристики фантомов

А1. Влияние фантома на значение эквивалента дозы в определенной точке поля нейтронного излучения связано, с одной стороны, с изменением плотности потока нейтронов за счет рассеянного излучения от фантома и, с другой стороны, изменением коэффициента качества за счет изменения спектра нейтронного излучения. Очевидно, что влияние фантома уменьшается с увеличением расстояния от поверхности фантома до рассматриваемой точки поля излучения. На Рисунке А1 показаны зависимости отношений значений эквивалента дозы, полученных при наличии фантома в виде параллелепипеда размером 30×30×15 см из тканеэквивалентного вещества, к значениям эквивалента дозы в той же точке поля нейтронов без фантома от расстояния от фантома (фантом удалялся от рассматриваемой точки) для нейтронов с определенными энергиями.

А2. Рассеивающие и замедляющие свойства фантома зависят от материала, из которого изготовлен фантом.

А2.1. Сравнительные характеристики фантомов, изготовленных из различных материалов, относительно эквивалента дозы нейтронов на поверхности фантома, облучаемого нейтронами с различными энергетическими спектрами, приведены в Таблице А1.

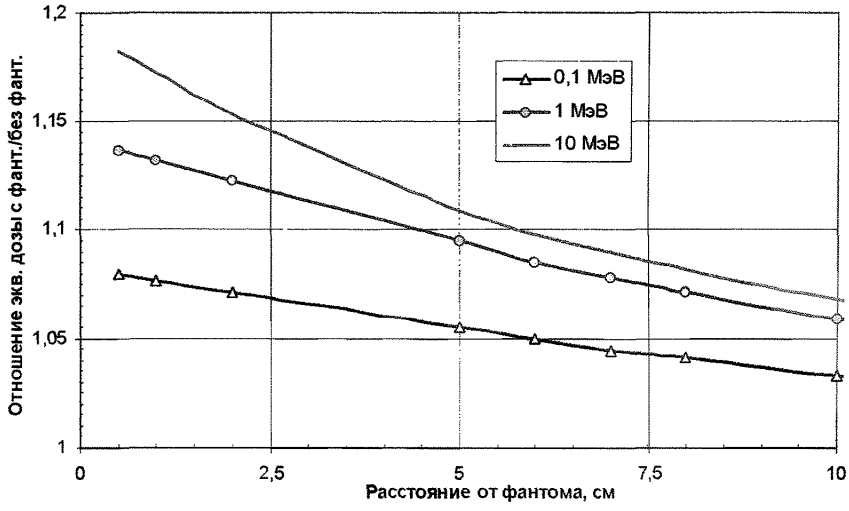


Рисунок А1 *- Влияние фантома на показания дозиметра в поле нейтронов с энергиями 0,1; 1 и 10 МэВ*

Таблица А1 *- Сравнительные характеристики фантомов, изготовленных из различных материалов, относительно эквивалента дозы нейтронов на поверхности фантома, облучаемого нейтронами с различными энергетическими спектрами*

Спектр нейтронов (источник)	Отношение эквивалента дозы нейтронов в мышечной ткани на поверхности плоских фантомов из различных материалов к эквиваленту дозы нейтронов в мышечной ткани на поверхности фантома из мышечного тканеэквивалентного вещества		
	Вода	Оргстекло	Полиэтилен
Cf	1,025	1,036	0,98
Cf-конус	1,022	1,035	0,95
Cf-коллиматор (УКПН)	1,022	1,033	0,97
Pu-Be	1,026	1,033	0,98
Pu-Be-коллиматор (УКПН)	1,029	1,036	0,98

А2.2. Сравнительные характеристики фантомов, изготовленных из различных материалов, относительно плотности потока тепловых нейтронов на поверхности фантома, облучаемого нейтронами с различными энергетическими спектрами, приведены в Таблице А2.

Таблица А2 - Сравнительные характеристики фантомов, изготовленных из различных материалов, относительно плотности потока тепловых нейтронов на поверхности фантома, облучаемого нейтронами с различными энергетическими спектрами

Спектр нейтронов (источник)	Отношение плотности потока тепловых нейтронов на поверхности плоских фантомов из различных материалов к плотности потока тепловых нейтронов на поверхности фантома из мышечного тканеэквивалентного вещества		
	Вода	Оргстекло	Полиэтилен
Cf	1,06	1,145	1,185
Cf-конус	1,075	1,075	1,084
Cf-коллиматор (УКПН)	1,054	1,062	1,13
Pu-Be	1,077	1,154	1,051
Pu-Be-коллиматор (УКПН)	1,065	1,082	1,173

А3. При размещении нескольких дозиметров на фантоме они могут оказывать влияние на условия облучения каждого из них.

А3.1. Показания дозиметра при размещении нескольких дозиметров на плоском фантоме, нормированные на показания единственного дозиметра, размещенного на фантоме, приведены в Таблице А3.

Таблица А3 - Показания дозиметра при размещении нескольких дозиметров на плоском фантоме, нормированные на показания единственного дозиметра, размещенного на фантоме

Спектр	Количество дозиметров	Положение рассматриваемого дозиметра	Показания при расстояниях между дозиметрами, мм		
			1	20	40
Pu-Be-(кол)	2	В центре	1,095 (1,004)	1,020 (1,001)	1,008 (1,000)
	3	В центре С краю	1,200 (1,009) 1,115 (1,000)	1,058 (1,004) 0,983 (0,991)	1,010 (1,001) 0,971 (0,976)
Cf-252	3	В центре С краю	1,140 (1,013) 1,066	1,032 (1,000) 1,0037	1,0037 (1,000) 0,998

В Таблице приведены значения: без скобок – относительная плотность потока тепловых нейтронов, в скобках – относительный эквивалент дозы.

Дополнение Б (справочное) к Приложению 6
Энергетическая зависимость чувствительности дозиметра

Б1. Энергетические зависимости чувствительности дозиметров различных типов сильно отличаются друг от друга. Из-за недоступности источников моноэнергетических нейтронов в широком диапазоне энергий, экспериментальное определение энергетической зависимости чувствительности представляет значительные трудности. Поэтому для этих целей используют экспериментальную информацию и теоретические оценки. Относительно доступным методом экспериментальной оценки энергетической зависимости чувствительности является интегральный метод определения чувствительности в полях нейтронов с существенно различающимися энергетическими спектрами (условно называемыми типовыми спектрами).

Б1.1. Типичные энергетические зависимости чувствительности термолюминесцентных дозиметров, основанных на регистрации альбедных нейтронов при перпендикулярном падении нейтронов различных энергий на фантом, относительно индивидуального эквивалента дозы $H_p(10)$ приведены на Рисунке Б1.

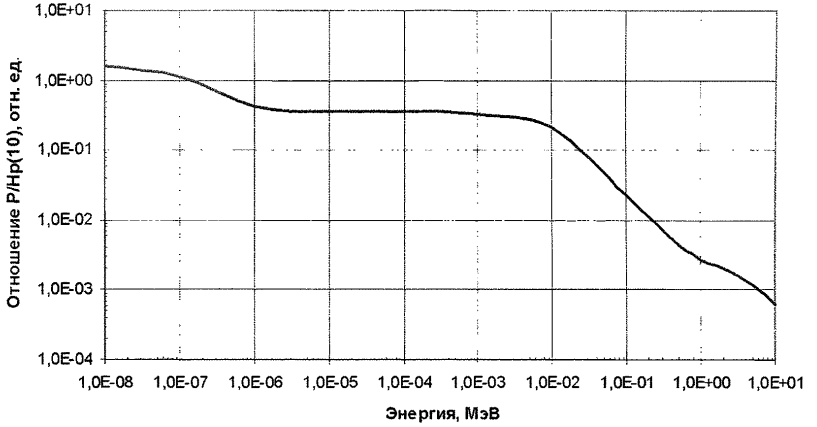


Рисунок Б1 *- Зависимость отношения значений плотности потока тепловых нейтронов на поверхности фантома при падении на него нейтронов различных энергий к индивидуальному эквиваленту дозы*

Б1.2. Типичная кривая энергетической зависимости чувствительности пузырьковых дозиметров (BD PND) приведена на Рисунке Б2.

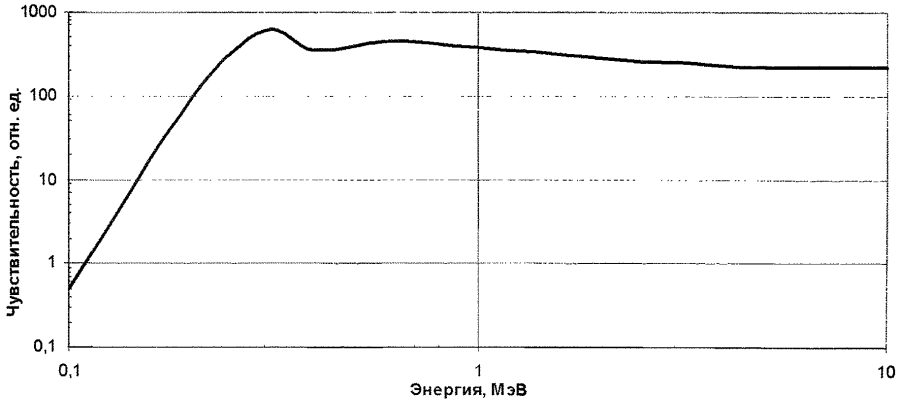


Рисунок Б2 *- Типичная кривая энергетической зависимости чувствительности пузырьковых дозиметров (BD PND)*

Для разных типов пузырьковых дозиметров энергетические зависимости чувствительности могут существенно различаться. В первую очередь это касается нижней границы энергий нейтронов.

Б2. Типичная кривая энергетической зависимости чувствительности для полупроводникового дозиметра с кремниевым детектором и полиэтиленовым радиатором приведена на Рисунке Б3.

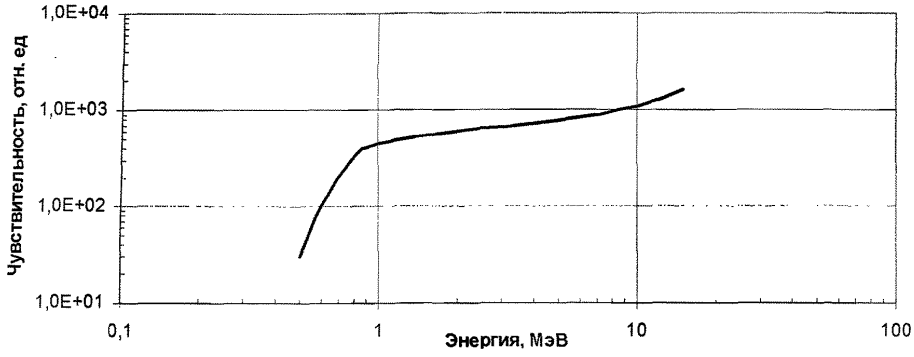


Рисунок Б3 - Отношение числа импульсов от ядер отдачи в полупроводниковом детекторе к индивидуальному эквиваленту дозы

Б3. Энергетическая зависимость чувствительности может корректироваться путем изменения толщины радиатора, изменения порога дискриминации, а также анализа амплитудного распределения импульсов от ядер отдачи.

Б4. Энергетическая зависимость чувствительности электронных индивидуальных дозиметров, в которых используются полупроводниковые детекторы с комбинированными радиаторами из полиэтилена и ^{6}Li и ^{10}B, является суперпозицией чувствительностей, приведенных на Рисунках Б2 и Б3.

При использовании двух независимых детекторов с различными радиаторами имеется возможность корректировать энергетическую зависимость чувствительности в зависимости от соотношения числа импульсов, полученных с разных детекторов, что достигается программным способом с помощью встроенного микропроцессора.

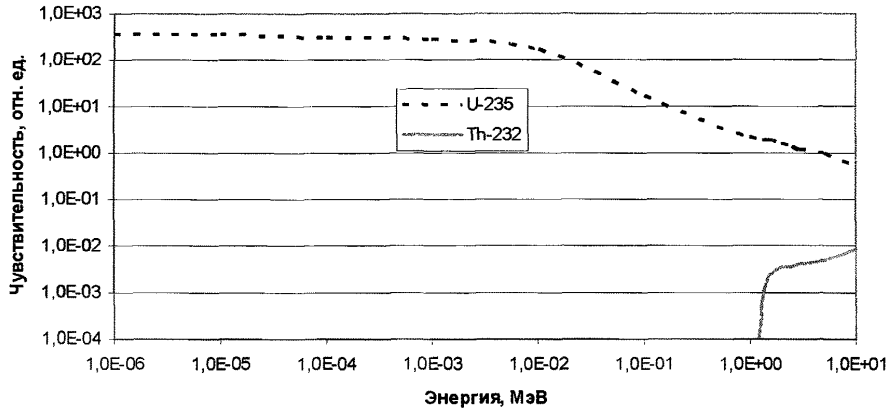


Рисунок Б4 - Энергетическая зависимость чувствительности относительно индивидуального эквивалента дозы нейтронов для трековых дозиметров с мишенями ^{235}U и ^{232}Th.

Б5. Энергетическая зависимость чувствительности для дозиметров на основе трекового метода измерений зависит от типа применяемых делящихся мишеней. На Рисунке Б4 приведены энергетические зависимости чувствительности трекового дозиметра при использовании мишеней ^{235}U или ^{232}Th (для сравнения данные приведены для одинакового количества ядер в мишенях).

При использовании трековых дозиметров с несколькими мишенями, имеющими существенно различную энергетическую зависимость чувствительности, возможна корректировка чувствительности путем анализа соотношения нормированных на одинако-

вое число ядер мишени числа треков, полученных от разных мишеней. Например, при одновременном использовании мишеней из ^{235}U и ^{232}Th такая корректировка возможна при значениях индивидуального эквивалента дозы более 0,5 мЗв.

Дополнение В (справочное) к Приложению 6
Влияние сопутствующих излучений на показания дозиметра

В1. Индивидуальный эквивалент дозы является аддитивной величиной, и его значение должно соответствовать эквиваленту дозы в теле человека на глубине 1 г/см^2 от всех видов ионизирующего излучения.

В2. При использовании дозиметра, предназначенного для измерения индивидуального эквивалента дозы $H_p(10)$ какого-либо излучения в смешанных полях, в показания дозиметра могут давать вклад другие виды излучений, для измерения которых дозиметр не предназначен (т. е. чувствительность дозиметра к этим видам излучений не соответствует требуемой). При этом могут быть следующие основные варианты использования дозиметров:

– дозиметр нейтронного излучения (сопутствующие излучения: фотонное и (или) бета);

– дозиметр гамма-нейтронного излучения (сопутствующие излучения: бета).

В2.1. Показание дозиметра будет правильным в полях, в которых присутствует бета-излучение, если показания дозиметра за счет бета-излучения будут соответствовать эквиваленту дозы бета-излучения на глубине 1 г/см^2. В других случаях измеренное значение будет больше или меньше реального значения индивидуального эквивалента дозы. Это определяется энергией бета-частиц и конструкцией дозиметра, в частности, толщиной слоя поглотителя до чувствительного элемента и размерами чувствительного элемента.

В2.1.1. На Рисунке В1 приведены зависимости поглощенной дозы от энергии электронов за фильтрами из тканеэквивалентного вещества различной толщины. Из Рисунка видно, что на глубину 1 г/см^2 будут проникать те частицы из бета-спектра, энергия которых более 2,3 МэВ (например, источники ^{144}Ce–^{144}Pr, ^{106}Ru–^{106}Rh).

Если толщина слоя поглощающих материалов (кожух, фильтр и т. д.) до чувствительного слоя блока детектирования будет меньше 1 г/см^2 , то вклад в показания дозиметра будут давать и бета-частицы с энергией менее 2,3 МэВ (например, ^{90}Sr–^{90}Y и др.).

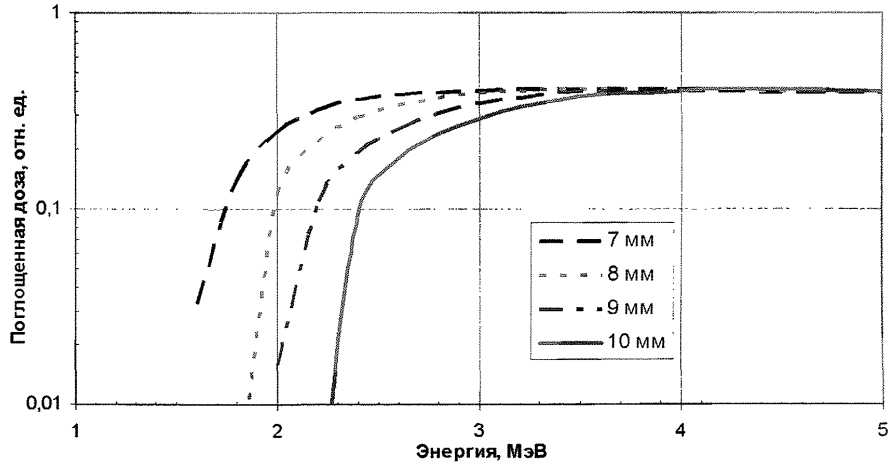


***Рисунок В1** - Зависимость значений поглощенной дозы от энергии электронов за фильтрами из тканеэквивалентного материала разной толщины*

В2.1.2. Если дозиметр используется в полях излучения, где существенна примесь бета-излучения с высокой граничной энергией бета-спектра, то для обеспечения правильности показаний дозиметра необходимо, чтобы суммарная толщина поглощающего слоя до чувствительного элемента составляла 1 г/см^2 (эффективная радиационная толщина) путем установки дополнительных поглотителей.

В2.1.3. Эффективная радиационная толщина может быть оценена расчетным методом, если известны материал и размеры конструктивных элементов и фильтров, являющихся поглотителями.

В2.1.4. Экспериментальная оценка радиационной толщины может быть проведена с использованием источника ^{106}Ru–^{106}Rh типа БИР следующим образом:

В2.1.4.1. Дозиметр с экстраполяционной или тонкостенной камерой градуируется в поле источника ^{137}Cs по поглощенной дозе (мощности поглощенной дозы) в условиях равновесия вторичных заряженных частиц, что достигается при установке камеры за фильтром из тканеэквивалентного вещества толщиной 3–4 мм.

В2.1.4.2. Между камерой и источником ^{106}Ru–^{106}Rh, установленным на определенном расстоянии от камеры, помещают фильтры из тканеэквивалентного материала различной толщины и снимают показания от камеры для каждого фильтра. Толщину фильтра увеличивают до размера, когда полностью поглощаются бета-частицы с максимальной энергией (примерно 25 мм), и через фильтр проходит только тормозное излучение, рождаемое в подложке источника и фильтре.

В2.1.4.3. Из показаний, полученных с каждым фильтром, вычитают показания, полученные с фильтром толщиной 25 мм.

В2.1.4.4. По полученным значениям строят кривую ослабления. Типичная кривая ослабления для источника ^{106}Ru–^{106}Rh типа БИР, полученная с экстраполяционной камерой, представлена на Рисунке В2.

В2.1.4.5. Исследуемый дозиметр устанавливают на том же расстоянии от источника и определяют его показания в единицах поглощенной дозы (эквивалента дозы) без фильтра.

В2.1.4.6. Между источником и дозиметром устанавливают фильтр из тканеэквивалентного вещества толщиной 2,5 см и определяют показания дозиметра.

В2.1.4.7. Определяют разность показаний дозиметра без фильтра и с фильтром.

В2.1.4.8. По кривой ослабления определяют, какой толщине поглотителя соответствует полученное значение разности показаний, и эта толщина принимается за значение эффективной радиационной толщины.

В2.1.4.9. Если значение эффективной радиационной толщины меньше 10 мм, то определяют толщину дополнительного фильтра, чтобы сумма значений эффективной радиационной толщины и толщины дополнительного фильтра составляла 10 мм.

В2.1.5. ***Пример.***

На Рисунке В2 представлена кривая ослабления от источника БИР-50, полученная с экстраполяционной камерой со стенкой толщиной 0,05 мм, как описано в пп. В2.1.4.1–В2.1.4.4.

Разность показаний, полученных в измерениях с исследуемым дозиметром без фильтра и с фильтром составила 0,2 мкЗв/с.

По кривой на Рисунке В2 определяем, что полученное значение мощности дозы соответствует толщине фильтра 4,5 мм (т. е. эффективная радиационная толщина составляет 4,5 мм).

Чтобы дозиметр правильно показывал значение индивидуального эквивалента дозы, необходимо добавить дополнительный фильтр из тканеэквивалентного вещества толщиной 5,5 мм.

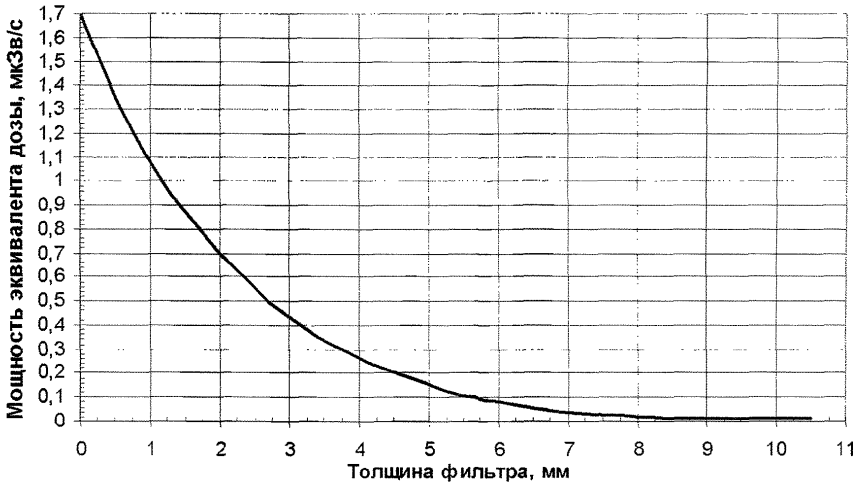


***Рисунок В2** - Зависимость ослабления мощности дозы, измеренной дозиметром с экстраполяционной камерой, фильтрами из тканеэквивалнтного материала*

В2.2. В индивидуальных дозиметрах, в которых доза нейтронов определяется как разность суммарной дозы и дозы фотонного излучения (например, использование детекторов, содержащих ^{6}Li и ^{7}Li), неопределенность результата измерения дозы нейтронов будет зависеть от вклада в суммарную дозу от фотонного излучения.

В2.3. Рассмотрим влияние гамма-излучения при определении индивидуального эквивалента дозы нейтронного излучения на примере использования для этих целей ТЛД-систем.

В2.3.1. В предположении, что чувствительностью детектора ^{7}LiF к тепловым нейтронам можно пренебречь, а чувствительность детекторов ^{7}LiF и ^{6}LiF к нейтронам за счет упругого рассеяния нейтронов одинакова с учетом поправки на относительную чувствительность, систему уравнений (А1) можно переписать в терминах индивидуального эквивалента дозы нейтронов и гамма-излучения следующим образом:

$$N_1 = H_n / K_n + H_\gamma / K_\gamma,$$
$$N_2 = H_\gamma / K_\gamma, \quad (1)$$

где:

H_n и H_γ – индивидуальный эквивалент дозы нейтронного и гамма-излучения соответственно;

K_n, K_γ – градуировочные коэффициенты, полученные при поверке (градуировке) термолюминесцентных альбедных дозиметров по индивидуальному эквиваленту дозы раздельно в полях нейтронного и гамма-излучения соответственно.

Значение индивидуального эквивалента дозы нейтронного излучения определяется при решении системы уравнений (1) как:

$$H_n = (N_1 - N_2) \times K_n. \quad (2)$$

В2.3.2. Относительная расширенная неопределенность с коэффициентом охвата равным 2 (относительная погрешность с доверительной вероятностью 0,95) результата измерения индивидуального эквивалента дозы определяется по формуле:

$$\Delta_H = \frac{2 \cdot \sqrt{(N_1^2 \cdot s_1^2 + N_2^2 \cdot s_2^2) + (N_1 - N_2)^2 \cdot s_K^2}}{(N_1 - N_2)}, \quad (3)$$

где S_1 и S_2 – относительные среднеквадратические отклонения результата наблюдения показаний светосуммы детектора 1 (чувствительного к нейтронам и фотонному излуче-

нию) и детектора 2 (чувствительного к фотонному излучению, но не чувствительного к нейтронам), которые определяются при поверке в поле нейтронного излучения следующим образом:

$$s_1 = \sqrt{\sum (N_{o1} - N_{o1i})^2 / (n-1)} \cdot \frac{100\%}{N_{o1}},$$

$$s_2 = \sqrt{\sum (N_{o2} - N_{o2i})^2 / (n-1)} \cdot \frac{100\%}{N_{o2}},$$

где:

N_{o1i} и N_{o2i} – показание светосуммы 1-го и 2-го детектора i-го дозиметра, получаемые при поверке в поле нейтронного излучения;

n – число облучаемых дозиметров при поверке;

N_{o1} и N_{o2} – среднее значение светосуммы 1-го и 2-го детекторов для n дозиметров.

s_k – стандартная неопределенность градуировочного коэффициента K_n, получаемая при поверке в поле нейтронного источника Pu-Be, размещенного на установке УКПН-1М.

$$s_к = \sqrt{\frac{\Delta_H^2}{3} + \frac{N_{o1} \cdot s_{o1}^2 + N_{o2}^2 \cdot s_{o2}^2}{(N_{o1} - N_{o2})^2}},$$

где:

Δ_H – погрешность аттестации установки УКПН-1М, указанная в свидетельстве;

s_{o1} и s_{o2} – относительные среднеквадратические отклонения результата измерения светосуммы для детекторов 1 и детекторов 2, которые определяются при поверке нейтронных альбедных дозиметров следующим образом:

$$s_{o1} = \sqrt{\sum (N_{o1} - N_{o1i})^2 / ((n-1)n)} \cdot \frac{100\%}{N_{o1}},$$

$$s_{o2} = \sqrt{\sum (N_{o2} - N_{o2i})^2 / ((n-1)n)} \cdot \frac{100\%}{N_{o2}}.$$

Примечание. *Если для поверки используются 10 и более дозиметров, погрешностями s_{o1} и s_{o2} можно пренебречь. Тогда $s_к = \Delta_H / \sqrt{3}$.*

<u>Примечание.</u> Неопределенность (погрешность), рассчитываемая по формуле (4), относится к следующим условиям облучения:

– энергетический спектр нейтронного излучения подобен спектру Pu-Be источника, размещенного в установке УКПН-1М;

– направление падающего излучения перпендикулярно плоскости дозиметра;

– дозиметр размещен на груди вплотную к телу.

В2.3.3. Пользуясь уравнениями (1), формулу (3) можно переписать через отношения вкладов фотонного и нейтронного излучений в виде:

$$\Delta_H = 2 \cdot \sqrt{\left(1 + \frac{H_\gamma}{H_n} \cdot \frac{K_n}{K_\gamma}\right)^2 \cdot s_1^2 + \left(\frac{H_\gamma}{H_n} \cdot \frac{K_n}{K_\gamma}\right)^2 \cdot s_2^2 + s_к^2}. \quad (4)$$

График зависимости расширенной неопределенности, рассчитанной по формуле (4) (погрешности с доверительной вероятностью 0,95), от отношения H_γ / H_n в поле смешанного гамма-нейтронного излучения представлен на Рисунке В3.

В2.4. В полупроводниковых дозиметрах при больших значениях мощности дозы фотонного излучения возможно добавление импульсов в нейтронный канал, которые возникают за счет наложения импульсов от фотонного излучения, что зависит от уровней дискриминации в каналах и алгоритма обработки измерительной информации по каналам.

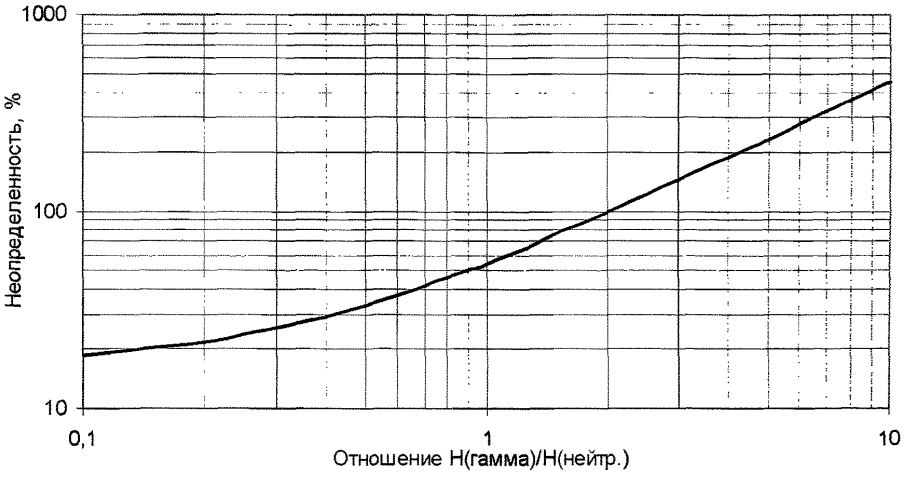


***Рисунок В3** - Зависимость неопределенности определения дозы отдельных компонент от отношения H_γ / H_n в поле смешанного гамма-нейтронного излучения*

Дополнение Г (справочное) к Приложению 6
Зависимость показаний от положения дозиметра на теле

Г1. При градуировке индивидуальных дозиметров они располагаются вплотную к фантому. В процессе эксплуатации дозиметр может находиться на некотором расстоянии от тела, поэтому измеренное значение индивидуального эквивалента дозы будет отличаться от того значения, которое было бы при размещении дозиметра вплотную к телу. При этом это отличие будет зависеть от используемого метода измерений и от энергетического спектра излучения.

Г1.1. Зависимость эквивалента дозы от энергии нейтронов для различных расстояний от фантома приведена на Рисунке Г1.

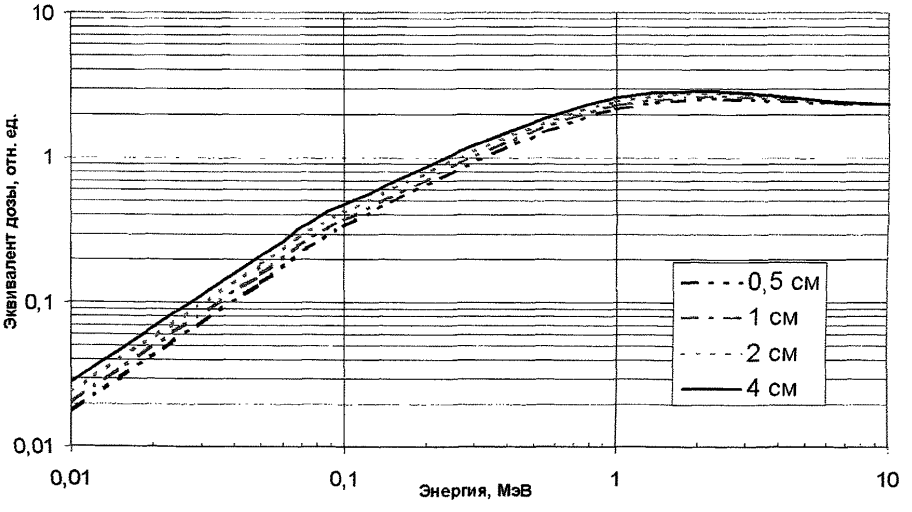


***Рисунок Г1** - Зависимость значений эквивалента дозы от энергии нейтронов для различных расстояний от фантома*

Д1.2. Дозиметры, в основе измерений которых используется регистрация альбедных тепловых нейтронов, имеют отклик, пропорциональный плотности потока тепловых нейтронов.

На Рисунке Г2 представлены зависимости значений плотности потока тепловых нейтронов на поверхности плоского тканеэквивалентного фантома от энергии падающих на фантом нейтронов для различных расстояний от фантома.

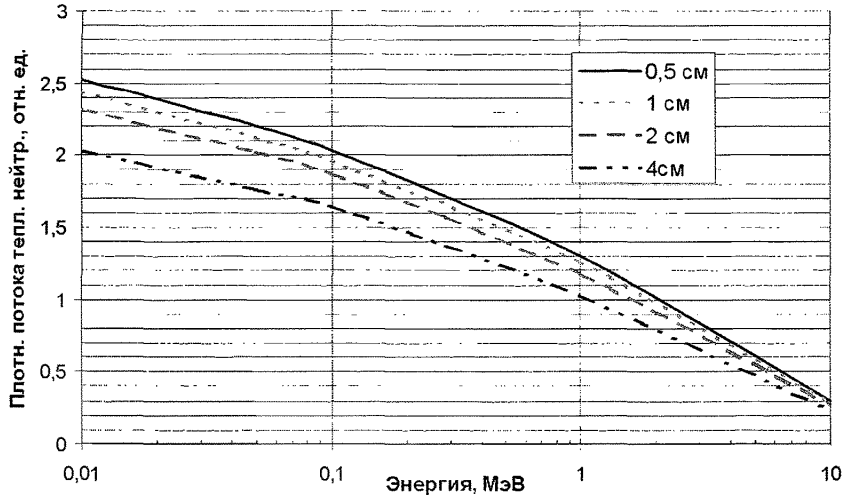


***Рисунок Г2** - Зависимости значений плотности потока нейтронов на поверхности плоского тканеэквивалентного фантома от энергии падающих на фантом нейтронов для различных расстояний от фантома*

На Рисунке Г3 представлены зависимости значений плотности потока тепловых нейтронов на поверхности плоского тканеэквивалентного фантома от падающих на фантом нейтронов с различными энергетическими спектрами для различных расстояний от фантома.

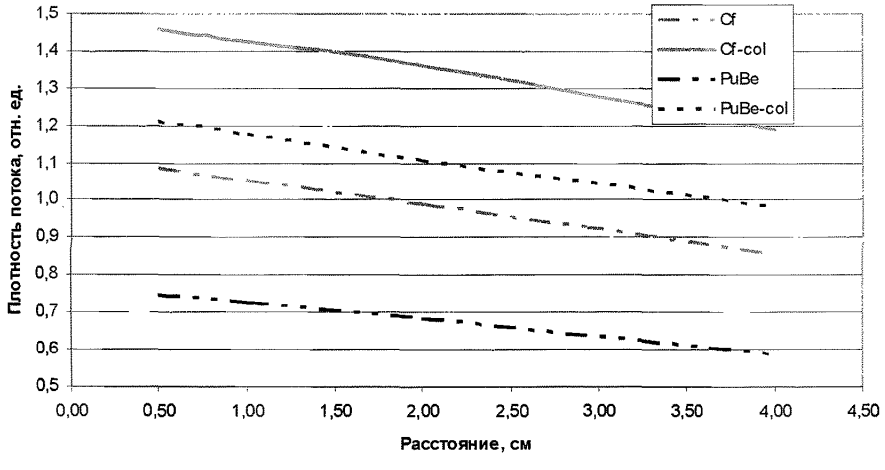


***Рисунок Г3** - Зависимости значений плотности потока тепловых нейтронов на поверхности плоского тканеэквивалентного фантома от падающих на фантом нейтронов с различными энергетическими спектрами для различных расстояний от фантома*

Дополнение Д к Приложению 6 (справочное)
Энергетическая зависимость коэффициента перехода от индивидуального эквивалента дозы к эффективной дозе

Д1. Соотношение между эффективной дозой и индивидуальным эквивалентом дозы имеет сложную зависимость от пространственного и энергетического распределения нейтронного излучения. Эта зависимость может устанавливаться только для определенной модели облучения. На Рисунке Д1 представлена зависимость отношения значений эффективной дозы и индивидуального эквивалента дозы $K_{ЭИ}(E)$ от энергии нейтронов при передне-заднем облучении.

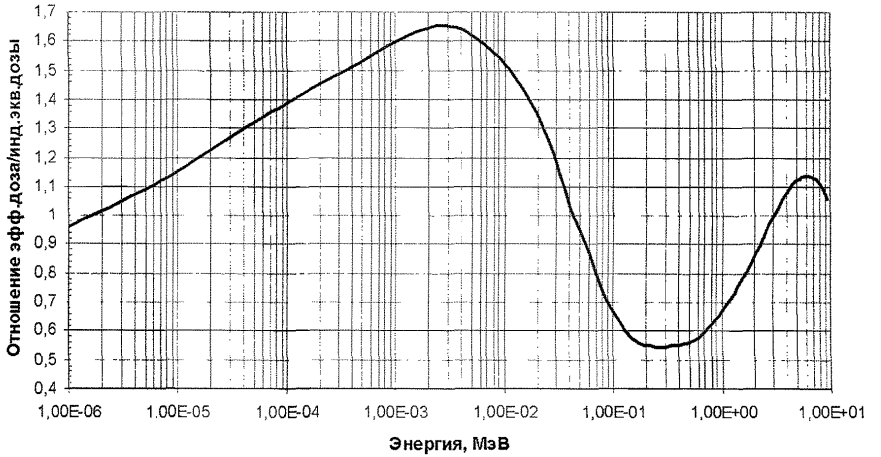


***Рисунок Д1** - Зависимость отношения значений эффективной дозы и индивидуального эквивалента дозы от энергии нейтронов при передне-заднем облучении*

Для спектра нейтронов $f(E)$ и определенного пространственного распределения среднее значение коэффициента $K_{ЭИ}$ рассчитывается по формуле:

$$K_{ЭИ} = \frac{\int f(E) \cdot K_{ЭИ}(E) \cdot dE}{\int f(E) \cdot dE} .$$

Д2. Поскольку дозиметры, основанные на разных методах измерений, имеют различную энергетическую чувствительность, очевидно, что коэффициент перехода от показаний дозиметра к эффективной дозе будет зависеть от конкретного типа дозиметра.

На Рисунке Д2 в качестве примера приведены зависимости от энергии нейтронов коэффициента перехода к индивидуальному эквиваленту дозы и эффективной дозе от показаний дозиметра на основе термолюминесцентного метода измерений.

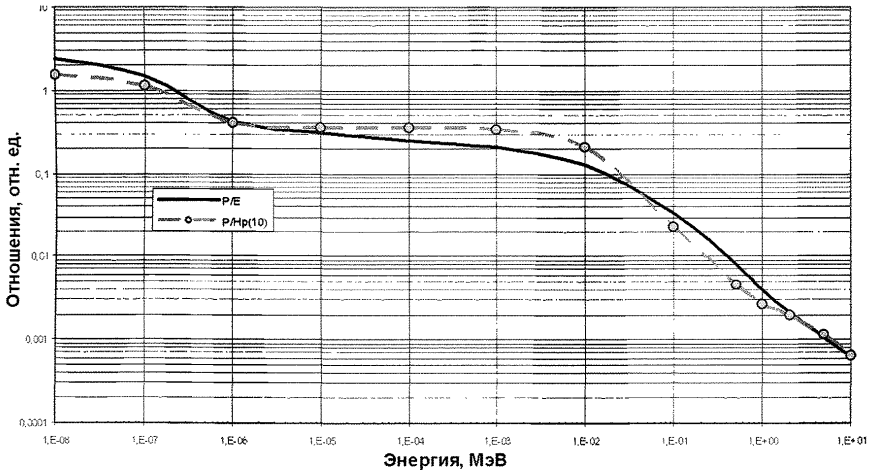


***Рисунок Д2** - Зависимость от энергии нейтронов коэффициента перехода к индивидуальному эквиваленту дозы и эффективной дозе от показаний дозиметра на основе термолюминесцентного метода измерений*

Приложение 7 (справочное)
Переходные коэффициенты для операционных величин нейтронного излучения

П7.1. Переходные коэффициенты между флюенсом нейтронов и операционными величинами, амбиентным и индивидуальным эквивалентами дозы из доклада 57 МКРЕ и публикации 74 МКРЗ приведены в таблице П7.1. Коэффициенты для амбиентного эквивалента дозы $H^*(10)$ приведены для моноэнергетических нейтронов, падающих на шар МКРЕ, а для индивидуального эквивалента дозы $H_p(10)$ на четырехэлементный тканеэквивалентный фантом размером 30×30×15 см.

В Таблице П7.1 приведены коэффициенты для амбиентного эквивалента дозы $H^*(10)$ для моноэнергетических нейтронов с энергиями до 200 МэВ, а для индивидуального эквивалента дозы $H_p(10)$ с энергиями до 20 МэВ. Углы α означают углы между нормалью на переднюю поверхность фантома и линией падения нейтронов на фантом.

***Таблица П7.1** – Переходные коэффициенты для амбиентного и индивидуального эквивалента дозы от флюенса нейтронов, $h^*_ф = H^*(10)/Ф$ и $h_{p,ф} = H_p(10)/Ф$, пЗв·см^2, для мононаправленного моноэнергетического поля нейтронов, падающих на сферу и фантом МКРЕ. Угол α означает угол между нормалью на переднюю поверхность фантома и линией падения нейтронов на фантом*

E, МэВ	$h^*_ф$	$h_{p,ф}$					
		α = 0°	α = 15°	α = 30°	α = 45°	α = 60°	α = 75°
1,00–09	6,60	8,19	7,64	6,57	4,23	2,61	1,13
1,00–08	9,00	9,97	9,35	7,90	5,38	3,37	1,50
2,53–08	10,6	11,4	10,6	9,11	6,61	4,04	1,73
1,00–07	12,9	12,6	11,7	10,3	7,84	4,7	1,94
2,00–07	13,5	13,5	12,6	11,1	8,73	5,21	2,12
5,00–07	13,6	14,2	13,5	11,8	9,40	5,65	2,31
1,00–06	13,3	14,4	13,9	12,0	9,56	5,82	2,40

E, МэВ	h^*_ϕ	$h_{p,\phi}$					
		α = 0°	α = 15°	α = 30°	α = 45°	α = 60°	α = 75°
2,00–06	12,9	14,3	14,0	11,9	9,49	5,85	2,46
5,00–06	12,0	13,8	13,9	11,5	9,11	5,71	2,48
1,00–05	11,3	13,2	13,4	11,0	8,65	5,47	2,44
2,00–05	10,6	12,4	12,6	10,4	8,10	5,14	2,35
5,00–05	9,90	11,2	11,2	9,49	7,32	4,57	2,16
1,00–04	9,40	10,3	9,85	8,64	6,74	4,10	1,99
2,00–04	8,90	9,84	9,41	8,22	6,21	3.91	1,83
5,00–04	8,30	9,34	8,66	7,66	5,67	3,58	1,68
1,00–03	7,90	8,78	8,20	7,29	5,43	3,46	1,66
2,00–03	7,70	8,72	8,22	7,27	5,43	3,46	1,67
5,00–03	8,00	9,36	8,79	7,46	5,71	3,59	1,69
1,00–02	10,5	11,2	10,8	9,18	7,09	4,32	1,71
2,00–02	16,6	17,1	17,0	14,6	11,6	6,64	2,11
3,00–02	23,7	24,9	24,1	21,3	16,7	9,81	2,85
5,00–02	41,1	39,0	36,0	34,4	27,5	16,7	4,78
7,00–02	60,0	59,0	55,8	52,6	42,9	27,3	8,10
1,00–01	88,0	90,6	87,8	81,3	67,1	44,6	13,7
1,50–01	132	139	137	126	106	73,3	24,2
2,00–01	170	180	179	166	141	100	35,5
3,00–01	233	246	244	232	201	149	58,5
5,00–01	322	335	330	326	291	226	102
7,00–01	375	386	379	382	348	279	139
9,00–01	400	414	407	415	383	317	171
1,00+00	416	422	416	426	395	332	180
1,20+00	425	433	427	440	412	335	210
2,00+00	420	442	438	457	439	402	274
3,00+00	412	431	429	449	440	412	306
4,00+00	408	422	421	440	435	409	320
5,00+00	405	420	418	437	435	409	331
6,00+00	400	423	422	440	439	414	345
7,00+00	405	432	432	449	448	425	361
8,00+00	409	445	445	462	460	440	379
9,00+00	420	461	462	478	476	458	399
1,00+01	440	480	481	497	493	480	421
1,20+01	480	517	519	536	599	523	464
1,40+01	520	550	552	570	561	562	503
1,50+01	540	564	565	584	575	579	520
1,60+01	555	576	577	597	588	593	535

E, МэВ	h^*_ϕ	$h_{p,\phi}$					
		α = 0°	α = 15°	α = 30°	α = 45°	α = 60°	α = 75°
2,00+01	600	600	595	619	615	619	570
3,00+01	515						
5,00+01	400						
7,50+01	330						
1,00+02	285						
1,25+02	260						
1,50+02	245						
1,75+02	250						
2,01+02	260						

П7.2. В стандарте ISO 8529-3 приведены переходные коэффициенты между флюенсом нейтронов и операционными величинами, амбиентным и индивидуальным эквивалентами дозы для источников эталонных излучений: калифорний-252 (^{252}Cf), калифорний-252 (^{252}Cf) в замедлителе из тяжелой воды, изотоп америция с изотопом бора (^{241}Am-B(α,n)), изотоп америция с бериллием (^{241}Am-Be(α,n)). Характеристики перечисленных источников эталонных излучений приведены в Таблице П7.2.

Надо иметь в виду, что приведенные переходные коэффициенты относятся к спектру излучений вышеуказанных источников в геометрии облучения «открытая геометрия» (далее ОГ), т. е. в условиях, когда вклад рассеянных нейтронов пренебрежимо мал. Такие условия создаются в достаточно больших помещениях – как видно из графика на Рисунке П.7.1 при размерах помещения больших, чем 10×10×10 м.

***Таблица П7.2** – Характеристики источников эталонных излучений*

Источник нейтронов	Период полураспада, лет	Средняя энергия по флюенсу (МэВ)	Средняя энергия по эквиваленту дозы (МэВ)	Отношения амбиентных эквивалентов дозы фотонов и нейтронов
^{252}Cf в замедлителе из тяжелой воды**	2,65	0,55	2,2	0,18
^{252}Cf	2,65	2,13	2,4	0,05***
^{241}Am-B(α,n)	432	2,72	2,8	0,2
^{241}Am-Be(α,n)	432	4,16	4,4	0,05

Примечания:

*** сфера ∅300 мм, заполненная тяжелой водой, покрыта кадмиевой оболочкой толщиной приблизительно 1 мм;*

**** для стальной оболочки приблизительно 2,5 мм толщины и свинцовой защиты толщиной 1 мм.*

Приведенные в Таблице П7.2 отношения амбиентных эквивалентов дозы фотонов и нейтронов относятся также к условиям облучения в геометрии ОГ.

П7.3. Необходимо отметить, что вклад рассеянных нейтронов в показания приборов достаточно велик, например, как указано в стандарте ISO 8529-2, такой вклад в показания альбедных дозиметров нейтронов при облучении источником ^{241}Am-Be(α,n) или ^{241}Am-B(α,n) в помещении размером 8,2×8,2×8,2 м составляет 40%.

В связи с этим нужно указать, что применение переходных коэффициентов из ISO 8529-3 между флюенсом нейтронов и операционными величинами для тех же источников в установках с коллимированным пучком (типа УКПН) или в геометрии ОГ в не очень больших помещениях приводит к большой погрешности.

Коэффициенты на Рисунке П.7.1 для плотности потока нейтронов в ОГ рассчитаны для помещений с разными размерами (длина×ширина×высота) как:
$K_R = (H_{R(\text{без конуса–с конусом})} / H_{100}) / (R/100)^2$ и нормированы на расстояние 100 см.

Для геометрии ОГ после вычитания из значения величины, полученной без конуса, значения величины, полученной с конусом, K_R должно равняться единице (т. е. должен соблюдаться закон обратных квадратов) с учетом ослабления и накопления нейтронного излучения. Очевидно, что расчет плотности потока по закону обратных квадратов для помещений, в которых, как правило, проводится поверка, приводит к большой погрешности.

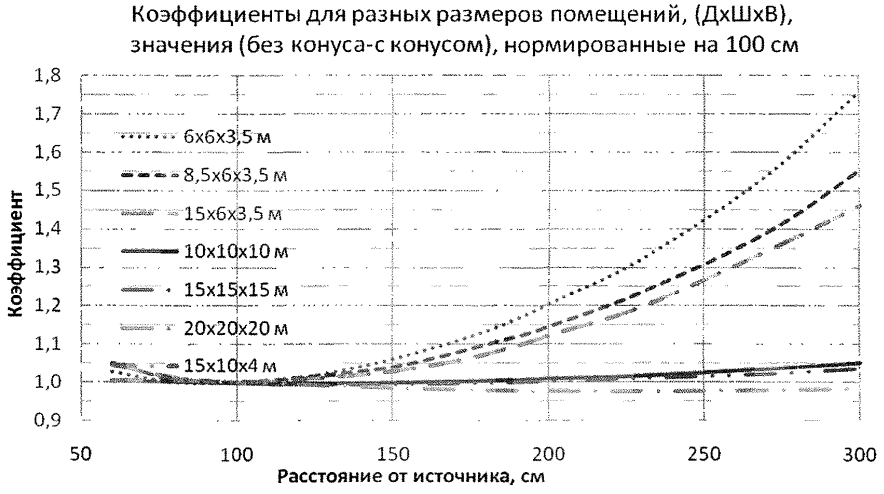


Рисунок П7.1 *- Коэффициенты K_R для плотности потока нейтронов в помещениях разных размеров в геометрии ОГ*