DOI: 10.22184/1992-4178.2022.214.3.118.121

Измерение энергетических распределений плотности потока излучений, или как правильно рассчитать мощность дозы от нейтронов и гамма-квантов

П. Руднев[1], И. Чешигин[2]

УДК 539.1.075 | ВАК 05.11.01

Количество систем и установок, в которых присутствует или используется ионизирующее излучение, возрастает с каждым годом. Развитие ядерной энергетики, широкое внедрение радиологических методов диагностики и лечения заболеваний делает все более актуальной проблему обнаружения и идентификации ионизирующих излучений для предотвращения возможности получения человеком критической дозы облучения. Существующие на сегодняшний день приборы дозиметрического контроля не позволяют точно определять характеристики полей, в особенности состоящих из нейтронов и гамма-квантов. В статье представлен новый подход к измерениям характеристик ионизирующих излучений, на основе которого был создан мобильный цифровой спектрометр-дозиметр, определяющий дозиметрический функционал исходя из оперативно измеряемых энергетических спектров нейтронов и гамма-квантов.

Начнем с главного – определения понятий поглощенной, эквивалентной, эффективной и амбиентной дозы, которые содержат в той или иной форме (явно или опосредованно) упоминание об энергии излучения и, как следствие, об энергетическом распределении ионизирующего излучения.

Важным процессом, дающим начало физико-химическим изменениям в облучаемом веществе и приводящим к определенному радиационному эффекту, является поглощение энергии ионизирующего излучения веществом. Отсюда непосредственно вытекает определение поглощенной дозы. Поглощенная доза показывает, какое количество энергии излучения поглощено в единице массы облучаемого вещества и определяется отношением поглощенной энергии ионизирующего излучения к массе поглощающего вещества. Исходя из этого определения, использование различных типов радиометров для дозиметрии по меньшей мере не корректно или допускается с большим количеством оговорок из-за невозможности точной интерпретации получаемых результатов. Только спектрометры с возможностью идентификации излучения дают информацию об энергетическом составе излучения.

На основе определения поглощенной дозы вводится понятие эквивалентной и эффективной дозы (биологической дозы), поскольку одинаковая поглощенная энергия оказывает разные эффекты на различные органы и ткани человека.

Эквивалентная доза рассчитывается путем умножения значения поглощенной дозы на специальный коэффициент относительной биологической эффективности (ОБЭ) или коэффициент качества для различных видов излучения, полученный эмпирически.

Эффективная доза – это величина, используемая как мера риска возникновения отдаленных последствий облучения всего тела человека и отдельных его органов и тканей с учетом их радиочувствительности. Она представляет собой сумму произведений эквивалентной дозы в органах и тканях на соответствующие взвешивающие коэффициенты (полученные эмпирически), сумма которых равна единице.

Эффективная и эквивалентная дозы являются нормируемыми величинами, то есть величинами, являющимися мерой ущерба (вреда) от воздействия ионизирующего излучения на человека. К сожалению, они не могут быть непосредственно измерены. Поэтому в практику введены операционные дозиметрические величины («амбиентный эквивалент дозы», синонимы которой «эквивалент амбиентной дозы» и «амбиентная доза»), максимально возможно

[1] ООО «Центр АЦП», директор, peter@centeradc.ru.

[2] НИЦ «Курчатовский институт».

приближенные к нормируемым и однозначно определяемые через физические характеристики поля излучения в точке. Из определения следует, что однозначной физической характеристикой поля излучения может быть только его спектральный энергетический состав, а не количество зарегистрированных частиц (интегральная по энергии плотность потока излучения), то есть 1/(см^2·с·МэВ), а не 1/(см^2·с). Если для определения дозы используется дозиметр, измеряющий интегральную по энергии плотность потока, то его использование оправдано только в том поле излучения, в котором он калибровался, что вытекает из определения амбиентной дозы.

Амбиентный эквивалент дозы H*(d) – это эквивалент дозы, который был создан в шаровом (тканеэквивалентном) фантоме ICRU (Международной комиссии по радиационным единицам, МКРЕ) на глубине d (мм) от поверхности по диаметру, параллельному направлению излучения, в поле излучения, идентичном рассматриваемому по составу, флюенсу и энергетическому распределению, но мононаправленном и однородном, то есть амбиентный эквивалент дозы H*(d) – это доза, которую получил бы человек, если бы он находился на месте, где проводится измерение.

Исходя из всего выше сказанного следует, что для обеспечения свертки абсолютного энергетического распределения плотности потока излучения в эффективную дозу в отечественных нормах радиационной безопасности (НРБ) (и в амбиентную дозу в зарубежных НРБ) представлены значения эффективной дозы (амбиентной дозы) на единичный флюенс для различных энергий излучения (конверсионные коэффициенты).

Таким образом, еще раз подчеркнем, что корректно рассчитать дозу (а не измерить) можно только измерив энергетическое распределение плотности потока нейтронов и гамма-квантов и никак иначе. Это полностью соответствует Нормам радиационной безопасности (НРБ99_2009) и документам Международного комитета по радиационной защите (ICRP).

За последние 60 лет приборостроение в области дозиметрии ионизирующих излучений улучшало только дополнительные сервисные возможности приборов, а их основные метрологические характеристики – погрешность, чувствительность, эффективность – практически не менялись и остаются сомнительными.

Сегодня на рынке есть два прибора, которые могут измерять спектры ионизирующих излучений. Один из них – времяпролетный спектрометр, который по времени пролета и фазе частицы может дать информацию только по энергии нейтронов. Это крупная (размером до сотен метров) экспериментальная установка работает, по сути, как счетчик частиц и о других показателях, в том числе плотности потока, информации не дает. Второй прибор – довольно громоздкий дозиметр-спектрометр нейтронов на основе полиэтиленовых замедлителей, который работает корректно только с известным спектром излучения. Причем проведение измерений таким спектрометром требует участия оператора, который проводит последовательную замену сфер-замедлителей. Такая процедура не обеспечивает оперативности измерений.

В компании «Центр АЦП» был создан прибор, лишенный недостатков устройств, используемых до сих пор в дозиметрии. Это сцинтилляционный спектрометр-дозиметр нейтронов и гамма-квантов типа SDMF (рис. 1) [1, 2]. Этот достаточно малогабаритный мобильный прибор (вес не более 10 кг, включая детектор и 20-метровый кабель) предназначен для измерения плотности потока медленных нейтронов и энергетического спектра плотности потока быстрых нейтронов и гамма-квантов в смешанных полях гамма-нейтронного излучения. Прибор работает в режиме реального времени, измеряя напрямую энергетический спектр быстрых нейтронов (по протонам отдачи) и спектр гамма-излучения (по комптоновским электронам) [3]. Спектрометр-дозиметр определяет дозиметрический функционал исходя из оперативно измеряемых энергетических спектров быстрых нейтронов и гамма-квантов. Причем спектры нейтронов и гамма-квантов измеряются одновременно, в режиме реального времени, с возможностью контроля набора статистики.

В спектрометре-дозиметре реализованы цифровые методы регистрации и обработки информации на основе применения высокопроизводительных АЦП и ПЛИС. Импульс, возникающий в детекторе при регистрации сцинтилляций, преобразуется в цифровую форму с помощью АЦП, а затем полученный цифровой массив подвергается процедуре идентификации. Благодаря высокоскоростной плате АЦП спектрометр-дозиметр позволяет разделять

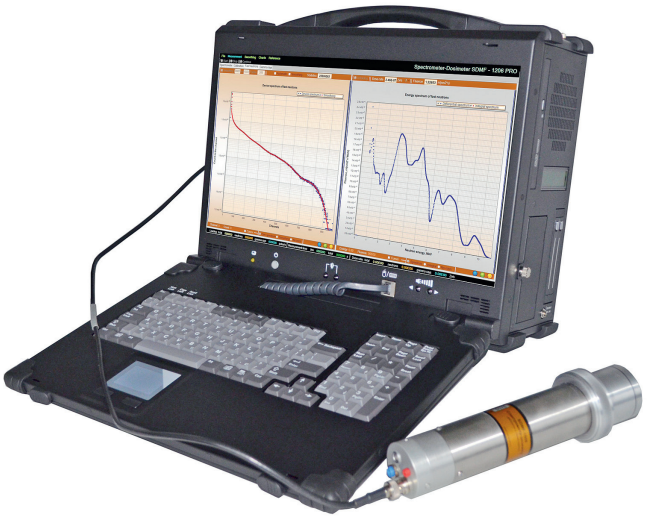

Рис. 1. Внешний вид спектрометра-дозиметра SDMF-1608SN с детектором быстрых нейтронов и гамма-квантов

Основные технические характеристики спектрометра-дозиметра SDMF-1608SN

Параметр	Значение
Диапазон энергий регистрируемого нейтронного излучения	0,03 эВ – 16 МэВ
Диапазон энергий регистрируемого гамма-излучения	100 кэВ – 8 МэВ
Нижняя/верхняя граница измерения мощности эффективной дозы	От фона до 0,175 Зв/ч
Долговременная нестабильность (72 ч)	0,5%
Среднее отклонение показаний от истинных значений при измерении плотности потока нейтронного излучения	Не более 5%
Среднее отклонение показаний от истинных значений при измерении мощности амбиентного эквивалента дозы нейтронного излучения	Не более 10%
Среднее отклонение показаний от истинных значений при измерении мощности амбиентного эквивалента дозы H*(10) гамма-излучения	Не более 10%
Энергетическое разрешение на энергии 661 кэВ (^{137}Cs)	Не более 11%
Анизотропия для нейтронного излучения	Не более 15%
Максимальный поток нейтронов через сцинтиллятор (без учета восстановления)	10^{13} н/см^2
Рабочая загрузка детектора	$3\cdot10^4$ имп/с, не более $1{,}1\cdot10^5$ имп/с
Размерность вычисляемых доз	Зв/ч, Зв/с, Гр/ч, Гр/с, рад/с, рад/ч, Р/с, Р/ч
Максимальное удаление детектора от спектрометра-дозиметра	Не более 20 м
Питание от аккумулятора +12 В (опция)	Около 3 ч
Габаритные размеры спектрометра-дозиметра	415×165×360 мм
Габаритные размеры детектора быстрых нейтронов и гамма-квантов	245×65 мм (диаметр)
Вес спектрометра-дозиметра, включая вес детектора	10 кг

по форме импульса гамма-кванты и нейтроны в смешанных полях большой интенсивности (до 10^5 имп/с или до $1{,}75\cdot10^5$ мкЗв/ч максимальной мощности дозы), получая при этом результаты высокой точности.

Основной блок детектирования спектрометра обеспечивает уникальный диапазон регистрации нейтронов (от 100 кэВ до 20 МэВ). Кроме того, прибор комплектуется дополнительным детектором медленных нейтронов для полного охвата диапазона энергий нейтронов. Дополнительный детектор позволяет измерить плотность потока и мощность дозы от медленных нейтронов с энергией менее 0,1 МэВ, составляющую, по оценкам, за защитой реакторных установок с водо-водяными реакторами по разным источникам 20–40% от суммарной мощности эффективной дозы нейтронов. Теперь это можно подтвердить или опровергнуть экспериментально.

Параметры спектрометра-дозиметра типа SDMF (энергия, плотность потока и мощность дозы) были подтверждены испытаниями в Национальном институте метрологии Германии (PTB) на ионном ускорителе с нейтронно-производящими мишенями (с энергией нейтронов от 24 кэВ до 19 МэВ) [4].

Спектрометр-дозиметр типа SDMF является надежным и универсальным инструментом. Он позволяет корректно определять мощность дозы радиационных полей, создаваемых любыми источниками излучений, включая смешанные поля. Его можно использовать также как эталон плотности потока быстрых нейтронов и гамма-квантов для калибровки других приборов, в том числе интегральных дозиметров.

Главное его отличие от существующего парка приборов всего мира – это возможность получать точные сведения об энергетическом спектре с указанием абсолютного значения плотности потока и о дозиметрических величинах полей неизвестного энергетического спектра.

Спектрометр-дозиметр может быть крайне полезным как прибор для измерения детальных характеристик энергетических спектров и определения на их основе мощности дозы нейтронного и гамма-излучений в экспериментах по облучению биологических и других объектов и в реперных экспериментах в области реакторной дозиметрии и радиационной защиты [5]. Эти реперные эксперименты выполняются с целью анализа характеристик радиационных полей, воздействующих на материалы и конструкции установок в экспериментальных и рабочих условиях, проверки и обоснования расчетных инструментов (методов, программ, библиотек констант) реакторной дозиметрии и радиационной защиты.

Прямые измерения нейтронного и гамма-спектров спектрометром-дозиметром также могут быть весьма эффективно использованы при натурных испытаниях защиты.

Перспективной областью применения спектрометра-дозиметра является медицина. С помощью этого прибора можно точно измерить мощность эффективной дозы от вторичных нейтронов и гамма-квантов на медицинских ускорительных установках. По оценкам специалистов, доза от терапевтического пучка гамма-квантов сопоставима с дозой от побочного нейтронного излучения, которое никто не учитывает. В настоящее время ведутся исследования с целью изучения воздействия побочного нейтронного излучения на пациента. Возможно, причиной рецидивов заболеваний после сеансов лучевой терапии является как раз нейтронное излучение. Если обеспечить защиту от этого излучения, то можно достичь лучших результатов по выживаемости пациентов и исключения рецидивов. Чтобы проверить эффективность такой защиты как раз нужны такие точные приборы, как спектрометр-дозиметр типа SDMF. Также для этой цели готовится к выпуску мультисферный нейтронный спектрометр MNS-20, работающий с высокими плотностями потока нейтронов в присутствии гамма-квантов.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Моисеев Н. Н., Дидык А. В.** Исследование сцинтилляционного спектрометра-дозиметра гамма-квантов и быстрых нейтронов // АНРИ. 2016. № 4. С. 24–30.
2. **Руднев П., Моисеев Н., Дидык А.** Спектрометр-дозиметр SDMF-1206PRO.DB – эффективный инструмент для исследования нейтронного и γ-излучения // ЭЛЕКТРОНИКА: Наука, Технология, Бизнес. 2016. № 8. С. 78–81.
3. **Колеватов Ю. И., Семенов В. П., Трыков Л. А.** Спектрометрия нейтронов и гамма-излучения в радиационной физике. Энергоатомиздат, 1991.
4. **Lutz B., Löb S.** Test Report PTB-6.4-2021/14N. Braunschweig. 2021.
5. **Большов Л. А.** Решение НТС №10 «Экология и радиационная безопасность» Госкорпорации «Росатом» по вопросу «Обеспечение контроля радиационной обстановки и радиационных рисков персонала на предприятиях Росатома», 20.12.2017.

КНИГИ ИЗДАТЕЛЬСТВА «ТЕХНОСФЕРА»

Цена 840 руб.

ЭТАЛОНЫ И СТАНДАРТНЫЕ ОБРАЗЦЫ В ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ ТЕХНИКЕ. ЭЛЕКТРОРАДИОИЗМЕРЕНИЯ

М.: ТЕХНОСФЕРА, 2018. – 402 с., ISBN 978-5-94836-512-1

Лукашкин В. Г., Булатов М. Ф.

Издание осуществлено при финансовой поддержке Федерального агентства по печати и массовым коммуникациям в рамках Федеральной целевой программы «Культура России (2012–2018 годы)»

В книге рассмотрены общие вопросы метрологического обеспечения и единицы физических величин. Изложены основные задачи технических средств метрологического обеспечения в области электрорадиоизмерений. Даны оценки погрешности и неопределенности первичных и рабочих эталонов.

Книга может быть полезна студентам и аспирантам при выборе и обосновании эталонной базы в области электрорадиоизмерений, а также специалистам, занимающимся вопросами разработки, производства и оценки качества средств измерений, контроля и испытаний.

КАК ЗАКАЗАТЬ НАШИ КНИГИ?

✉ 125319, Москва, а/я 91; ✆ +7 495 234-0110; 🖷 +7 495 956-3346; **knigi@technosphera.ru, sales@technosphera.ru**