



Применение природных материалов с низким содержанием радионуклидов в качестве защиты от внешнего фона

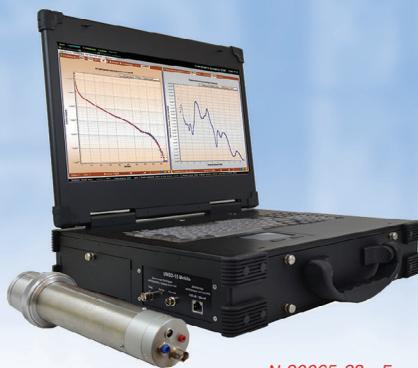
Определение поглощенной дозы гамма-излучения с применением химической дозиметрии

Метод контроля радона в зданиях на основе рационального критерия оценки соответствия

ПРИБОР НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ

SDMF-1608SN

Спектрометр-дозиметр нейтронов и гамма-квантов



№90065-23 в Госреестре СИ РФ

Назначение

Спектрометр-дозиметр типа **SDMF-1608SN** является средством измерения и предназначен для измерения энергетического распределения плотности потока нейтронов и гамма-квантов в реальном времени. Также позволяет измерять интегральный поток медленных нейтронов с помощью второго детектора.

Основываясь на измерении спектров нейтронов и гамма-квантов вычисляется мощность эффективной и поглощенной дозы, а также мощность амбиентного эквивалента дозы.

Для гамма излучения также вычисляется мощность экспозиционной дозы и мощность поглощенной дозы в воздухе.

Все дозовые характеристики рассчитываются исходя из геометрии источника радиации и условий облучения человека.

Отличительные особенности

- Одновременное измерение энергетических спектров быстрых нейтронов и гамма-квантов одним детектором.
- Спектрометр-дозиметр работает в реальном масштабе времени.
- Измерение как непрерывных (например, "реакторных"), так и линейчатых (изотопных) энергетических спектров.
- Измерение плотности потока быстрых нейтронов и гамма-квантов в абсолютных единицах (частица * см⁻² * с⁻¹ * МэВ⁻¹).
- Максимальная нагрузка по входу детектора 3 * 10⁴ импульсов.

Информация для заказа

- **SDMF-1608SN** – Возимый спектрометр-дозиметр с диапазоном энергий нейтронов от 0.03 эВ до 16 МэВ и гамма-квантов от 240 кэВ до 8 МэВ.
- **UNSD-20** – Универсальный нейтронный спектрометр-дозиметр с диапазоном энергий нейтронов от 0.03 эВ до 20 МэВ и гамма-квантов от 100 кэВ до 9 МэВ.
- **SDMF-1608** – Возимый спектрометр-дозиметр с диапазоном энергий нейтронов от 1 МэВ до 19 МэВ и гамма-квантов от 500 кэВ до 8 МэВ.
- **SDMF-1206SN** – Возимый спектрометр-дозиметр с диапазоном энергий нейтронов от 0.03 эВ до 12 МэВ и гамма-квантов от 100 кэВ до 6 МэВ.

Применение

- Средство измерения энергетического распределения плотности потока нейтронов и гамма-квантов за биологической защитой ядерно-энергетических установок.
- Определение мощности эффективной дозы, мощности амбиентного эквивалента дозы и мощности поглощенной дозы нейтронов и гамма-квантов.
- Определение мощности экспозиционной дозы гамма излучения.
- Эталон плотности потока быстрых нейтронов.
- Калибратор интегральных дозиметров для гамма и нейтронных полей.
- Калибратор для проверки установок, формирующих поля излучения быстрых нейтронов и гамма-квантов.

ПАРАМЕТРЫ	ЗНАЧЕНИЯ
Диапазон энергий регистрируемого нейтронного излучения (с дополнительным детектором медленных нейтронов)	(0.03 эВ – 100 кэВ)* 500 кэВ - 16 МэВ
Диапазон энергий регистрируемого гамма излучения	240 кэВ – 8 МэВ
Количество энергетических каналов быстрых нейтронов и гамма-квантов	1024
Нижняя и верхняя граница измерения мощности эффективной дозы	(от 0.2 до 17 500**) мкЗв/ч
Среднее отклонение показаний от истинных значений при измерении интегральной (дифференциальной) плотности потока нейтронного излучения	не более ±7% (±15%)
Среднее отклонение показаний от истинных значений при измерении мощности амбиентного эквивалента дозы нейтронного излучения	не более ±12%
Среднее отклонение показаний от истинных значений при измерении мощности амбиентного эквивалента дозы Н*(10) гамма излучения	не более +12%
Энергетическое разрешение на энергии 662 кэВ (¹³⁷ Cs) при детекторе 40x40	не более 12%
Анизотропия для нейтронного излучения	не более +30%
Максимальный поток нейтронов через сцинтиллятор (без учета восстановления)	10 ¹³ н/см ²
Рабочая нагрузка детектора	10 ⁴ импульс/с
Размерность вычисляемых доз	Зв/ч, Зв/с, Гр/ч, Гр/с, рад/с, рад/ч, Р/с, Р/ч
Питание от аккумулятора +12В***	не более 3 часов
Размер спектрометра-дозиметра, мм	415 x 165 x 360
Размер детектора быстрых нейтронов, мм	245 x диаметр 65
Размер детектора медленных нейтронов, мм	190 x диаметр 59
Вес спектрометра-дозиметра, включая вес детекторов	не более 10 кг

* - один энергетический канал

** - при соблюдении максимальной нагрузки

*** - опция под заказ



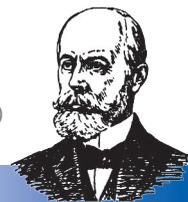
ООО «Центр АЦП»

Россия, 125040, Москва, ул. Верхняя, д. 6
тел.: (499) 257-45-03, 257-45-09, 257-45-14

mail@centeradc.ru
www.centeradc.ru

СОДЕРЖАНИЕ номера

АНТУАН
АНРИ
БЕККЕРЕЛЬ
(1852—1908)



НАУЧНЫЕ СТАТЬИ

- 3** Пространственное распределение характеристик неоднородного стационарного поля источника быстрых нейтронов
М.Д. Пышкина, А.В. Васильев, А.А. Екидин, Е.И. Назаров, Л.А. Мищенко, О.И. Фуртикова
- 21** Твердотельные детекторы оптических сигналов и радиации. Часть 1.2. Обзор конструкций и характеристик детекторов (продолжение)
С.Л. Виноградов
- 32** Экстраполяционная ионизационная камера в твердотельном фантоме для воспроизведения поглощенной дозы низкоэнергетического рентгеновского излучения
А.В. Берлянд, В.А. Берлянд, К.А. Кольцов
- 39** Определение поглощенной дозы гамма-излучения в интенсивных радиоактивных полях с применением химической дозиметрии
Е.Е. Куницына, В.И. Жованик
- 47** Применение природных материалов с низким содержанием радионуклидов в качестве защиты от внешнего фона при проведении лабораторных гамма-спектрометрических и радиометрических измерений
В.П. Поваров, В.С. Росновский, Е.И. Юрченко, В.Н. Карасев, С.В. Росновский, В.В. Добрынин, Ф.Г. Соколов, А.А. Смородинов

ПОЛЕМИКА

- 56** Кризис регулирования радона в России: проблема тестирования зданий и альтернативный метод. Часть 2
А.А. Цапалов, П.С. Микляев, Т.Б. Петрова, С.И. Кувшинников
- 75** Оценка соответствия помещений зданий требованиям Норм радиационной безопасности по ограничению содержания радона в воздухе. Методика радиационного контроля (проект)
А.А. Цапалов, П.С. Микляев, Т.Б. Петрова, С.И. Кувшинников
- 96** Комментарий к дискуссионной статье «Кризис регулирования радона в России: дискуссия с регулятором по актуальным вопросам. Часть 1»
С.М. Киселев

АНРИ

АППАРАТУРА И НОВОСТИ
РАДИАЦИОННЫХ ИЗМЕРЕНИЙ
№1 (120) 2025

Журнал находится в **ПЕРЕЧНЕ рецензируемых научных изданий Высшей аттестационной комиссии (ВАК)** Министерства образования и науки РФ, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук

Журнал включен в Российский индекс научного цитирования
www.elibrary.ru

Главный редактор: А.Н. Мартынюк

Вып. редактор: М.Н. Мартынюк

Макетирование и компьютерная верстка: М.Н. Мартынюк, С.А. Петрова

Адрес редакции:

124460, Москва, а/я 50, НПП «Доза»
Тел.: (495) 777-13-36,
(495) 777-84-85 (доб.605)

E-mail: anry@doza.ru

Журнал зарегистрирован комитетом РФ по печати 24 января 1995 г., свидетельство № 013255

© Научно-производственное предприятие «Доза», 2025 г.
Подписано к печати 12.02.2025 г.
Объем 6 уч.-изд.л. Тираж 400 экз.

Редакция не несет ответственности за содержание рекламных объявлений
Рукописи не возвращаются
Использование материалов допускается только с письменного разрешения редакции

Фото на обложке: подземная пещерная церковь Сицилийской иконы Божьей матери, Воронежская обл., с. Дивногорье (к статье В.П. Поварова и др.). Источник – фотобанк «Фотодженика»

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ EDITORIAL BOARD

Jozef Sabol, профессор (доцент), г. Прага

Алексеев И.В., к.ф.-м.н., г. Санкт-Петербург

Бахур А.Е., д.г.-м.н., г.н.с., г. Москва

Будыка А.К., профессор, д.ф.-м.н., г.н.с., г. Москва

Ермилов А.П., к.т.н., г.н.с., г. Москва, Зеленоград

Жуковский М.В., профессор, д.т.н., к.ф.-м.н., г. Екатеринбург

Иванов О.П., д.ф.-м.н., г. Москва

Кожемякин В.А., к.т.н., г. Минск

Коренков И.П., профессор, д.б.н., к.т.н., г. Москва

Кутьков В.А., к.ф.-м.н., в.н.с., г. Москва

Линге И.И., д.т.н., г. Москва

Мартынюк Ю.Н., к.ф.-м.н., г. Москва, Зеленоград

Микляев П.С., профессор РАН, д.г.-м.н., г.н.с., г. Москва

Нурлыбаев К., к.т.н., г.н.с., г. Москва, Зеленоград

Сегаль М.Д., д.т.н., в.н.с., г. Москва

Скоморохов А.О., профессор, д.т.н., г. Обнинск

Jozef Sabol, Professor, Ph.D, D.Sc, Prague

Alexeev Ilya, Ph.D of Physico-mathematical Sciences, St.Petersburg

Bakhur Alexander, G.-M.D., Chief Research Scientist, Moscow

Budyka Alexander, Professor, Ph.M.D., Chief Research Scientist, Moscow

Ermilov Alexey, Ph.D. of Engineering Sciences, Chief Research Scientist, Moscow, Zelenograd

Zhukovsky Mikhail, Professor, D.Sc., Ph.D. of Physico-mathematical Sciences, Ekaterinburg

Ivanov Oleg, D.Sc., Moscow

Kozhemyakin Valery, Ph.D of Engineering Sciences, Minsk

Korenkov Igor, Professor, B.D., Ph.D of Engineering Sciences, Moscow

Kut'kov Vladimir, Ph.D of Physico-mathematical Sciences, Leading Research Scientist, Moscow

Linge Igor, D.Sc., Moscow

Martynyuk Yury, Ph.D of Physico-mathematical Sciences, Moscow

Miklyaev Peter, Professor, G.-M.D., Chief Research Scientist, Moscow

Nurlybaev Kubeyzin, Ph.D, Chief Research Scientist, Moscow, Zelenograd

Segal Mikhail, D.Sc., Leading Researcher, Moscow

Skomorokhov Alexander, Professor, D.Sc., Obninsk

ПОДПИСКА



Варианты оформления подписки:

РЕДАКЦИЯ ЖУРНАЛА «АНРИ»

Возможно оформление годовой подписки или приобретение любого номера



on-line подписка
www.doza.ru/anry



124460, Москва, а/я 194
УМЦ «Контроль
и безопасность»



anry@doza.ru



+7 (495) 777-13-36

АГЕНТСТВО «УРАЛ-ПРЕСС»



on-line подписка
www.ural-press.ru

АГЕНТСТВО «ДЕЛОВАЯ ПРЕССА»



on-line подписка
www.delpress.ru

Для стран СНГ и Балтии подписка производится только по каталогам агентств

Выпуски журнала в электронном виде, начиная с 2003 года, размещены на сайте www.elibrary.ru

Сетевая версия журнала расположена по адресу: www.anry.pro

Правила оформления статей (для авторов): www.doza.ru/files/pravila.pdf; anry.pro/avtoram

В редакции журнала вы можете приобрести pdf-версию выпусков журнала или подписаться на рассылку pdf-версий новых номеров

Пространственное распределение характеристик неоднородного стационарного поля источника быстрых нейтронов

Представлены результаты исследования стационарного поля нейтронного излучения поверочной установки УКПН-1М в нормальных условиях эксплуатации. Показано влияние отражающих и поглощающих поверхностей, материалов конструкций, оборудования и оснастки на модерацию спектра энергий нейтронов. В отдельных точках помещения, где расположен УКПН-1М, доля тепловых нейтронов в энергетическом спектре возрастает до 7,5 раз, и вдвое – доля нейтронов промежуточных энергий. Для данных локальных участков пространства вклад в МАЭД тепловых нейтронов увеличивается с 0,3% до 3,7%, а нейтронов промежуточных энергий с 5,9% до 18,1% в сравнении с участками пространства без эффекта модерации спектра энергий нейтронов окружающими материалами. Эффект модерации потока нейтронов приводит к завышению результатов измерения МАЭД нейтронного излучения в сравнении с рассчитанным значением МАЭД по энергетическому спектру в 3,77, 1,54 и 1,25 раза, соответственно, для ДКС-96 с БДКН-96, ДКС-96 с БДМН-96 и МКС-АТ1117М с БДКН-06.

Ключевые слова:

нейтронное излучение, спектры, модерация, мощность дозы, средства измерения, метрология.

**М.Д.Пышкина¹, А.В.Васильев¹,
А.А.Екидин¹, Е.И.Назаров¹,
Л.А.Мищенко², О.И.Фуртикова³**

¹ Институт промышленной экологии УрО РАН, г. Екатеринбург

² ФБУ Уралтест, г. Екатеринбург

³ ООО «АЭБ «Альфа-X91», г. Екатеринбург

Устойчивое развитие Российской Федерации, реализация национальных проектов во многом опирается на применение и развитие радиационных и ядерных технологий [1]. Расширение масштаба применения атомной энергии в мирных и оборонных целях приводит к росту реальных и потенциальных источников радиационного воздействия на человека и окружающую среду. Защита персонала, гарантии соблюдения приемлемого радиационного риска работников организаций основаны на поддержании, в соответствии с принципами нормирования, обоснования и оптимизации на возможно более низком уровне радиационного воздействия. Оценка индивидуальных доз облучения производится путем применения

средств и методов измерения амбиентного, направленного и индивидуального эквивалента дозы. Данные измеряемые параметры внешнего излучения являются мерой эффективной или эквивалентной дозы, свободной от недооценки и излишней переоценки для большинства встречающихся на практике радиационных полей [2,3]. Результаты измерений, используемые в целях защиты жизни и здоровья персонала, должны отвечать требованиям объективности, достоверности и воспроизводимости, а показатели точности измерений не выходить за установленные границы. Подтверждение метрологических характеристик средств измерений проводится в результате процедуры первичной и/или периодической поверки. Поверку средств измерений осуществляют организации, аккредитованные в соответствии с законодательством Российской Федерации об аккредитации в национальной системе аккредитации на проведение поверки средств измерений [4].

В условиях повышения национальных и международных требований к обеспечению ядерной и радиационной безопасности требуется модернизация и развитие технических и аналитических систем обеспечения контроля за ядерной и радиационной безопасностью в соответствии с научно обоснованными критериями. Совершенствование системы индивидуального дозиметрического контроля основывается на ускоренном развитии научно-методических основ дозиметрии, метрологическом обеспечении, стандартизации, сертификации и качества измерений [5].

Повышение качества измерений затрагивает вопросы идентификации, оценки значимости и исключения или снижения факторов неопределенности, возникающих при проведении поверки средств измерений. Ранее выполненные исследования показали, что нейтронные поля, создаваемые однотипными Pu-Be источ-

никами равной активности и потоком нейтронов, но размещенные в различных по площади, конфигурации и наполнения помещениях, имеют различное соотношение вклада в плотность потока нейтронов различных энергий [6,7]. Отражающие и поглощающие поверхности, материалы конструкций (стены, полы, потолки), оборудование и оснастка производят модерацию спектра энергий нейтронов, специфическую для каждого варианта размещения источника, формируя существенный вклад нейтронов тепловых энергий в поле, созданное источником преимущественно нейтронов быстрых энергий. Моделирование откликов индивидуальных дозиметров на модифицированные поля нейтронов с различным спектром распределения нейтронов по энергии предсказывает возможность неопределенности оценки эффективной дозы до 160% [8]. Для повышения объективности результатов индивидуального дозиметрического контроля облучения нейтронами вводят специфические для каждого рабочего места поправочные коэффициенты [9,10,11]. Инструментальное подтверждение вводимых поправочных коэффициентов, полученных расчетным способом на основе исследований характеристик энергетического и углового распределения плотности потока нейтронного излучения на рабочих местах возможно в организациях, аккредитованных на проведение поверки радиометров и дозиметров нейтронов. Для проведения таких работ необходимо изготовить поверочную установку для создания нейтронного поля, имитирующего энергетический спектр рабочего места. Требуется целый ряд различных типов моделируемых полей, которые покрывали бы все разнообразие форм рабочих полей нейтронов. Для описания таких полей необходимо определить энергетический спектр, а также угловую зависимость флюенса нейтронов в исходном положении [12]. Некоторые аспекты создания и применения подобных референсных полей

описаны в работе [13]. Для исключения или учета возможной/вероятной модификации поля нейтронов в помещении поверочной установки необходимы достоверные сведения о пространственном и энергетическом распределении плотности потока нейтронного излучения, создаваемого источником поверочной установки.

Целью настоящей работы являлось исследование стационарного поля нейтронного излучения поверочной установки УКПН-1М в нормальных условиях эксплуатации с учетом специфических условий ее размещения.

Была определена следующая последовательность исследований:

- выделить в помещении поверочной установки УКПН-1М точки измерений мощности амбиентного эквивалента дозы (далее МАЭД) нейтронного излучения;

- в выбранных точках выполнить измерения МАЭД нейтронного излучения переносными приборами с различными техническими характеристиками;
- провести измерения энергетического распределения нейтронного излучения в выбранных точках помещения, где расположена поверочная установка;
- рассчитать принятое значение МАЭД в каждой выбранной точке с учетом полученного энергетического распределения нейтронного излучения.

Приборы и методы

Изучение полей нейтронного излучения помещения поверочной установки УКПН-1М проводилось в несколько этапов. На первом этапе помещение поверочной установки УКПН-1М было разделено на квадраты

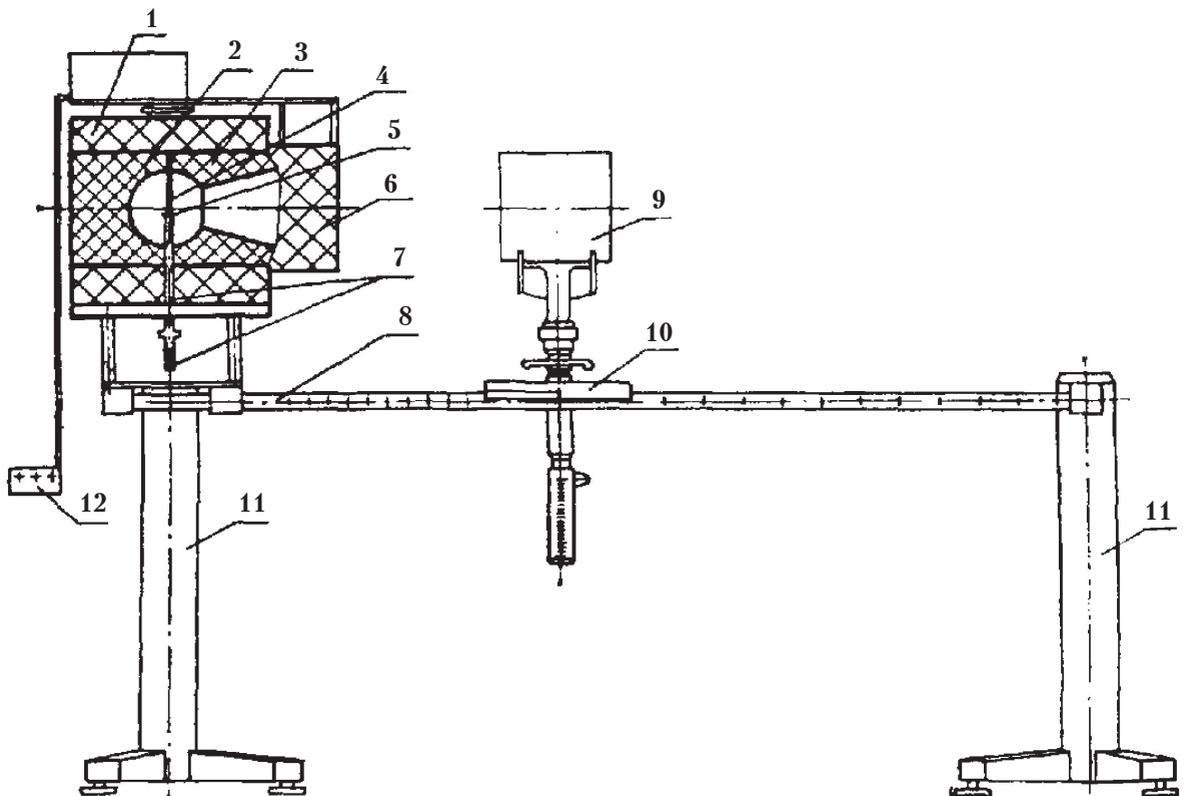


Рис.1. Установка УКПН-1М [14]: 1 – цилиндр; 2 – пробка к диафрагме; 3 – диафрагма; 4 – источник нейтронов; 5 – подставка для источника; 6 – заслон; 7 – стойка для источника и механизм перемещения источника; 8 – направляющая; 9 – блок детектирования поверяемого прибора; 10 – подставка-тележка для блока детектирования поверяемого прибора; 11 – стойка; 12 – блок переключателей.

со сторонами 1 м таким образом, что поверочная установка находилась в одном из узлов сетки. Упорядоченная плотная сетка точек измерения физических параметров поля нейтронов позволяет выделить степень однородности стационарного поля, возможные градиенты его исследуемых характеристик, идентифицировать эффект модерации в виде равномерно или хаотичного изменения энергетического спектра нейтронов, оценить влияние на результаты прямых измерений МАЭД, оценить масштаб поправочного коэффициента к результату прямых измерений МАЭД в условиях изменения энергетического распределения плотности потока нейтронного излучения.

Установка поверочная УКПН-1М состоит из защитного контейнера, представленного цилиндром с диаметром 500 мм и высотой 500 мм, изготовленного из полиэтилена высокого давления с примесью бора и окруженного листовым кадмием толщиной 1 мм. В центре защитного контейнера имеется сквозное отверстие диаметром 300 мм, в которое вставляются диафрагма и пробка к диафрагме, изготовленные из такого же материала, что и защитный контейнер. Апертура угла диафрагмы 0,26 ср, диаметр выходного отверстия 200 мм, диаметр полости 200 мм [14]. При необходимости пучок нейтронов перекрывается заслоном. Устройство установки показано на рис.1.

Помещение поверочной установки нейтронного излучения УКПН-1М представляет собой помещение неправильной формы размерами 9,4 м на 5,5 м с дополнительным выступом в конце комнаты размером 0,84 м на 2,1 м. Высота помещения до плит перекрытия – 3,51 м. Размеры помещения соответствуют требованиям, предъявляемым к помещениям при проведении поверки приборов, предназначенных для измерения физических и дозиметрических величин нейтронного излучения [15].

В помещении располагаются поверочная установка УКПН-1М (на расстоянии 1,54 м от

левой стены и 4,36 м от задней стены), рентгеновская установка, хранилище источников, массивная перегородка у дверного проема, собранная из нейтронстопа, и стеллажи, стоящие вдоль правой стены и переднего выступа. В качестве источников нейтронного излучения использовался $^{238}\text{Pu}-\alpha\text{-Be}$ -источник ИБН-8-7 с плотностью потока быстрых нейтронов $401 \text{ с}^{-1}\cdot\text{см}^{-2}$ и плотностью потока тепловых нейтронов $101 \text{ с}^{-1}\cdot\text{см}^{-2}$ на расстоянии 1 метр (25.12.2021). Поток тепловых нейтронов создан с применением формирователя поля нейтронов. Основная относительная погрешность значений плотности потока не превышает 4% для уровня доверительной вероятности 95%.

Значения мощности AMBIENTНОГО эквивалента дозы нейтронного излучения на расстоянии 1 и 2 м от источника, установленные при последней аттестации установки, составляют 479,2 и 119,8 мкЗв/ч соответственно. Основная относительная погрешность значений эквивалента доз не превышает 4% для уровня доверительной вероятности 95%. Источник нейтронного излучения в составе поверочной установки УКПН-1М прошел процедуру метрологической аттестации в качестве государственного эталона 1-го разряда единиц потока и плотности потока нейтронов в установленном порядке. Все результаты, представленные в настоящей работе, получены для поверочной установки без применения формирователей полей.

Второй этап состоял из измерения AMBIENTНОГО эквивалента дозы нейтронного излучения переносными приборами в узлах упорядоченной сетки точек измерения. Каждым прибором проводилось от 3 до 5 замеров во всех точках с целью снижения статистической составляющей погрешности. Для измерения AMBIENTНОГО эквивалента дозы нейтронного излучения применялись три прибора: дозиметр-радиометр ДКС-96 с блоками детектирования БДКН-96 и БДМН-96 [16], а также дозиметр-радиометр МКС-АТ1117М с блоком детектирования

Табл.1. Выделяемые диапазоны энергий и их дозиметрические характеристики.

Наименование диапазона энергий нейтронов	Диапазон энергий нейтронов	Взвешивающий коэффициент излучения, W_R МКРЗ 60 [20]		Взвешивающий коэффициент излучения, W_R МКРЗ 103 [21]	
		Диапазон энергий нейтронов	Значение фактора	Диапазон энергий нейтронов	Значение фактора
Высокие энергии (релятивистские)	более 10 МэВ	более 20 МэВ	5	более 50 МэВ	$W_R = 2,5 + 3,25e^{-[\ln(0,04E_n)]^2/6}$ (1)
		от 2 до 20 МэВ	10	от 1 до 50 МэВ	$W_R = 5,0 + 17,0e^{-[\ln(2E_n)]^2/6}$ (2)
Быстрые	от 10 кэВ до 10 МэВ	от 100 кэВ до 2 МэВ	20		
		от 10 до 100 кэВ	10		
		Промежуточные	от 100 эВ до 10 кэВ	менее 10 кэВ	5
Медленные	менее 1 эВ		5		
Эпитепловые	от 0,025 до 1 эВ	5			
Тепловые	0,025 эВ	5			
Холодные	от $5 \cdot 10^{-5}$ до 0,25 эВ	5			

БДКН-06 [17]. Дозиметр-радиометр ДКС-96 с блоком детектирования БДКН-96 предназначен для измерения МАЭД, АЭД и плотности потока нейтронного излучения в диапазоне энергий от 0,025 эВ до 14 МэВ. Предел допускаемой основной относительной погрешности измерения МАЭД нейтронного источника ^{238}Pu - α -Be составляет $\pm 26\%$. Энергетическая зависимость $\pm 40\%$. Анизотропия $\pm 30\%$. Дозиметр-радиометр ДКС-96 с блоком детектирования БДМН-96 предназначен для измерения МАЭД и АЭД нейтронного излучения в диапазоне энергий от 0,025 эВ до 10 МэВ. Предел допускаемой основной относительной погрешности измерения МАЭД нейтронного источника составляет $\pm 26\%$. Энергетическая зависимость $\pm 40\%$. Анизотропия $\pm 30\%$. Дозиметр-радиометр МКС-АТ1117М с блоком детектирования БДКН-06 предназначен для измерения МАЭД, АЭД и скорости счета нейтронного излучения в

диапазоне энергий от 0,025 эВ до 16 МэВ. Предел допускаемой основной относительной погрешности измерения МАЭД нейтронного излучения $\pm 20\%$. Относительная чувствительность от угла падения до минус 25%. Принципиальное отличие применяемых дозиметров-радиометров заключалось в используемом детекторе и геометрии замедлителя. Блок детектирования БДКН-96 имеет в качестве детектора ^3He пропорциональный счетчик, окруженный полиэтиленовым замедлителем цилиндрической формы с внешним диаметром 100 мм. Блок детектирования БДМН-96 состоит из детектора на основе LiF с содержанием ^6Li 85% с добавлением ZnS(Ag), окруженного полиэтиленовым замедлителем сферической формы с внешним диаметром 245 мм. Используемые дозиметры-радиометры имели действующую поверку. Измерения дозиметрических величин проводилось в соответствии с процедурой, описанной

Табл.2. Результаты измерений МАЭД дозиметрами-радиометрами в точках.

№ точки	МАЭД, мкЗв/ч				Отношение МАЭД прибора к МАЭД по спектру, отн. ед.		
	ДКС-96 с БДКН-96	ДКС-96 с БДМН-96	МКС-АТ 1117М с БДКН-06	Значение по спектру	ДКС-96 с БДКН-96	ДКС-96 с БДМН-96	МКС-АТ 1117М с БДКН-06
1	434	410	461	526	0,83	0,78	0,88
2	93	86	115	132	0,70	0,65	0,87
3	67	57	64	66	1,02	0,86	0,98
4	54	46	43	49	1,10	0,94	0,89
5	60	31	39	42	1,42	0,74	0,93
6	70	37	37	35	1,97	1,05	1,06
7	68	37	32	30	2,27	1,23	1,06
8	58	25	58	61	0,96	0,41	0,95
9	66	37	45	44	1,52	0,86	1,04
10	38	15	22	35	1,06	0,42	0,61
11	-	-	-	-	-	-	-
12	59	42	32	31	1,94	1,36	1,03
13	72	44	53	49	1,47	0,89	1,09
14	79	72	101	107	0,74	0,68	0,95
15	37	21	28	26	1,40	0,79	1,08
16	39	21	29	23	1,67	0,92	1,24
17	43	15	23	20	2,14	0,75	1,12
18	40	13	10	17	2,31	0,76	0,57
19	34	12	15	12	2,86	0,97	1,25
20	30	10	12	11	2,81	0,98	1,12
21	-	-	-	-	-	-	-
22	-	-	-	-	-	-	-
23	35	15	18	19	1,81	0,78	0,93
24	33	16	18	16	2,12	1,03	1,15
25	28	13	16	15	1,91	0,89	1,05
26	26	10	12	10	2,56	0,99	1,25
27	34	18	22	22	1,53	0,81	1,01
28	30	13	17	16	1,88	0,84	1,08
29	21	8	10	9	2,32	0,91	1,13
30	18	6	8	8	2,33	0,77	1,08
31	55	33	43	46	1,21	0,71	0,95
32	35	17	19	18	2,00	0,94	1,10
33	27	10	13	13	2,16	0,77	1,03
34	25	10	15	14	1,81	0,72	1,10
35	24	10	8	6	3,77	1,54	1,23
36	27	8	11	9	3,00	0,86	1,21



Рис.2. Дозиметр-радиометр МКС-АТ1117М с блоком детектирования БДКН-06 и набором полиэтиленовых сфер-замедлителей.

в эксплуатационной документации в соответствии с описанием типа.

Третий этап работы включал измерение спектров нейтронного излучения в узлах той же упорядоченной сетки точек измерения. Измерения нейтронных спектров проводились с помощью дозиметра-радиометра МКС-АТ1117М с блоком детектирования БДКН-06 и набором полиэтиленовых сфер-замедлителей (рис.2) по аттестованной методике, номер в реестре № ФР.1.38.2020.37361.

Для измерения плотности потока нейтронов блок детектирования БДКН-06 размещался на высоте, соответствующей высоте пучка поперечной установки 1,5 м (рис.3).



Рис.3. Вид помещения с установкой УКПН-1М.

Разработка и испытание многосферного дозиметра-радиометра обсуждались в статье [18]. Скорости счета, полученные с помощью дозиметра-радиометра, использовались для расчета нейтронных спектров. В этой работе был использован один из самых популярных алгоритмов восстановления нейтронного спектра. Этот алгоритм основан на изменении параметров, включенных в описание спектра. Более подробную информацию об этом алгоритме можно найти в исследовании [19].

На сегодняшний день отсутствует единая принятая классификация нейтронного излучения по диапазонам энергий, что приводит к тому, что современные подходы к оценке воздействия нейтронного излучения принято рассматривать с учетом специфики отдельных диапазонов энергии нейтронов (табл.1) [12].

Рассчитываемые для соответствующего диапазона энергий нейтронов значения взвешивающего фактора (1–3) позволяют оценить неизмеряемое значение эффективной дозы облучения нейтронами – основную дозиметрическую величину, применяемую в качестве меры ущерба здоровью человека от радиационного облучения. Для выполнения инструментального



Табл.3. Вклад нейтронов энергетических групп в плотность потока и МАЭД.

№ точки	Вклад в плотность потока, %			Вклад в МАЭД, %		
	Быстрые (0,5–20 МэВ)	Промежуточные (1 эВ – 0,5 МэВ)	Медленные (0,001 – 1 эВ)	Быстрые (0,5–20 МэВ)	Промежуточные (1 эВ – 0,5 МэВ)	Медленные (0,001 – 1 эВ)
1	71	24	5	93,9	5,9	0,3
2	62	31	7	93,6	6,0	0,3
3	52	37	11	93,1	6,3	0,6
4	47	42	11	90,1	9,2	0,7
5	39	48	13	89,1	10,0	0,9
6	35	52	14	87,1	11,8	1,1
7	34	50	15	87,4	11,3	1,2
8	52	35	13	94,4	4,9	0,7
9	42	46	12	90,4	8,8	0,8
10	40	50	10	87,8	11,5	0,7
11	-	-	-	-	-	-
12	33	48	19	84,0	14,6	1,4
13	40	49	11	88,6	10,7	0,8
14	53	41	6	90,9	8,7	0,3
15	32	51	17	84,3	14,3	1,4
16	31	47	21	84,5	13,8	1,7
17	30	49	21	83,5	14,7	1,8
18	28	49	23	87,3	10,4	2,2
19	20	55	24	80,2	16,9	2,9
20	19	53	28	78,4	18,1	3,5
21	-	-	-	-	-	-
22	-	-	-	-	-	-
23	34	45	21	86,8	11,5	1,6
24	27	53	20	82,8	15,3	1,9
25	27	55	18	81,9	16,4	1,7
26	26	51	23	83,7	14,0	2,3
27	37	46	37	87,0	11,8	1,2
28	30	47	24	83,5	14,5	2,0
29	27	49	25	84,8	12,8	2,4
30	29	47	24	89,0	8,7	2,3
31	51	37	12	94,0	5,3	0,7
32	35	48	17	90,2	8,4	1,3
33	25	51	23	81,0	16,8	2,2
34	32	52	16	87,5	11,1	1,3
35	21	53	25	86,0	10,8	3,2
36	19	53	28	83,7	12,6	3,7

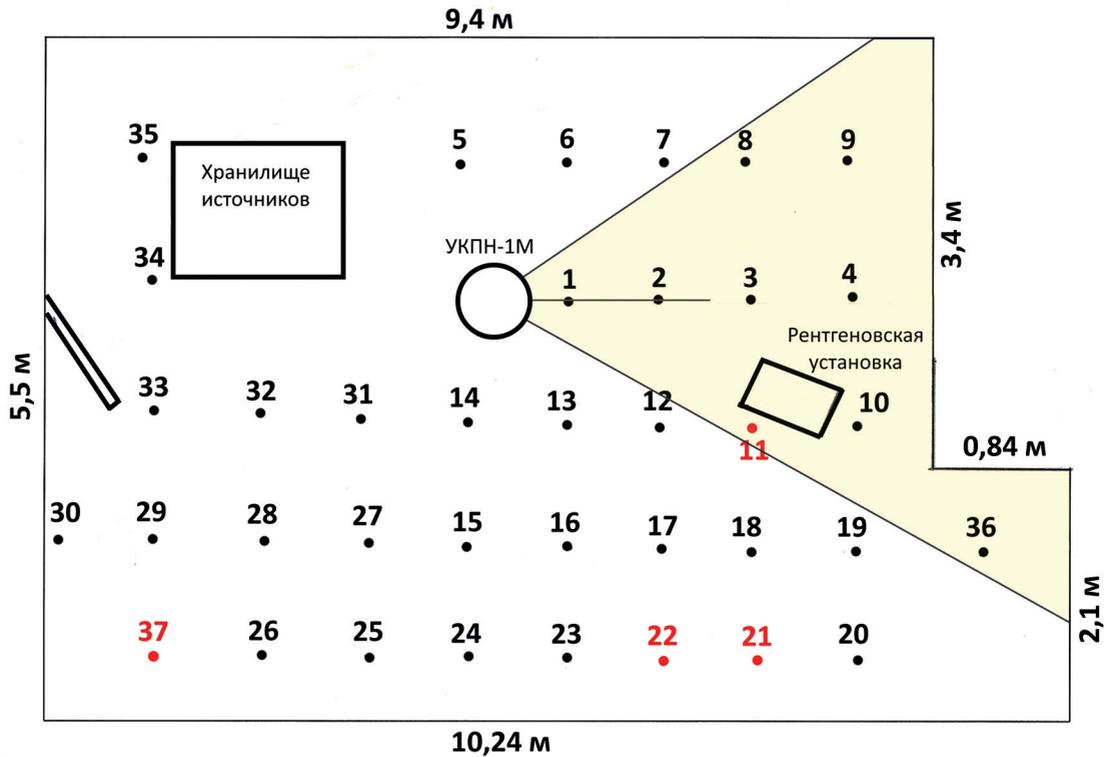


Рис. 4. Схема расположения точек измерений: черным цветом обозначены точки, в которых проводились измерения, красным – измерения отсутствуют.

контроля внешнего облучения в нейтронных полях применяются измеряемые величины – AMBIENTНЫЙ (или индивидуальный) эквивалент дозы (или мощности дозы) и плотность потока нейтронного излучения в точке измерения. Для метрологической поверки средств измерения используются эти же величины. Качество результата поверки напрямую зависит от стабильности и однородности характеристик аттестованного поля нейтронного излучения в локальных участках пространства проведения поверочных испытаний средств измерения. В реальных условиях существует вероятность проявления эффекта модерации нейтронов, приводящего к регистрируемым изменениям в пространстве характеристик поля нейтронного излучения.

В настоящей работе в каждой обследованной точке получены результаты прямого измерения и расчетные значения МАЭД на основе оценок энергетического распределения плотности потока нейтронного излучения. Метод

оценки энергетического распределения плотности потока нейтронного излучения подробно описан в опубликованной работе [6-7].

Данные о распределении энергии нейтронов в каждой исследованной точке помещения позволили определить значение МАЭД нейтронного излучения в соответствии с формулой [15]:

$$\dot{H}^*(10) = \int_0^{\infty} h^*(10, E) \cdot \Phi_E(E) dE, \quad (4)$$

где $h^*(10, E)$ – удельный AMBIENTНЫЙ эквивалент дозы в зависимости от энергии нейтронного излучения, $\Phi_E(E)$ – энергетическое распределение плотности потока нейтронного излучения в точке измерения.

В настоящей работе представлены результаты расчета мощности AMBIENTНОГО эквивалента дозы в каждой выбранной точке с учетом энергетического распределения нейтронного излучения в соответствии с формулой (4). Весь спектр нейтронного излучения был разбит на 34 энергетических диапазона от 10^{-9} до 20 МэВ. Так как сравнение значений МАЭД

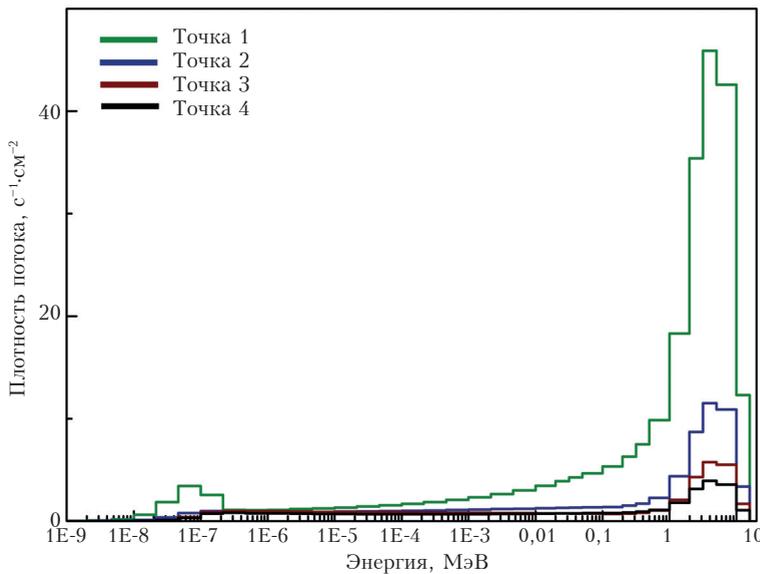


Рис.5а. Энергетическое распределение плотности потока нейтронного излучения в направлении пучка: точки 1, 2, 3, 4.

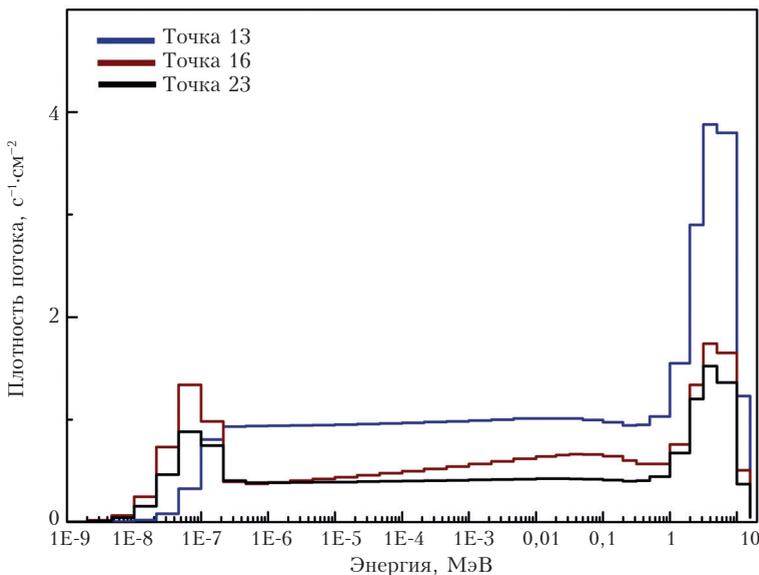


Рис.5б. Энергетическое распределение плотности потока нейтронного излучения в направлении, перпендикулярном пучку: точки 13, 16, 23.

во всех 34-х энергетических диапазонах лишено смысла, они были объединены в 3 энергетических диапазона:

- быстрых нейтронов (0,5 – 20 МэВ);
- промежуточных нейтронов (1 эВ – 0,5 МэВ);
- медленных нейтронов (0,001 – 1 эВ).

Для радионуклидных источников характерный спектр при нормальных условиях окру-

жающей среды лежит в диапазоне от 10^{-8} до 20 МэВ. Холодные нейтроны и сверхбыстрые нейтроны могут наблюдаться только при работе на специфических научно-исследовательских установках в специально созданных условиях.

Результаты

В помещении поверочной установки удалось выделить 37 точек, в 33 из которых были проведены измерения. Расположение узлов сетки (точек измерений) представлено на рис.4 (желтым цветом отмечен сектор, куда попадает непосредственно прямой пучок нейтронного излучения).

В табл.2 приведены результаты прямых измерений МАЭД дозиметрами-радиометрами, а также приведены рассчитанные по формуле (4) значения МАЭД, полученные с использованием измеренного спектра нейтронного излучения в точках измерений.

Расположение точек 1 и 2 соответствует расположению точек с аттестованными значениями МАЭД. Срав-

нение полученных в ходе исследований значений МАЭД в указанных точках с аттестованными значениями позволяет оценить достоверность данных настоящей работы. В точке 1 все полученные в ходе исследования значения МАЭД отличаются от аттестованных значений (без учета основной относительной погрешности аттестованного значения)

не более установленного предела допускаемой основной относительной погрешности средств измерений:

- ДКС-96 с БДКН-96 ниже на 9,4%;
- ДКС-96 с БДМН-96 ниже на 14,4%;
- МКС-АТ117М с БДКН-06 ниже на 3,8%;
- расчет МАЭД по спектру энергии нейтронов выше на 9,8%.

В точке 2 аналогичное отличие удовлетворительно не для всех полученных данных:

- ДКС-96 с БДКН-96 ниже на 22,4%;
- ДКС-96 с БДМН-96 ниже на 28,2%;
- МКС-АТ117М с БДКН-06 ниже на 4,0%;
- расчет МАЭД по спектру энергии нейтронов выше на 10,2%.

В точке 2 результат измерения МАЭД с помощью ДКС-96 с БДМН-96 отличается от аттестованного значения на величину, превышающую установленный предел допускаемой основной относительной погрешности прибора. Однако если учесть то, что основная относительная погрешность аттестованного значения составляет 4%, то результат измерений МАЭД с помощью ДКС-96 с БДМН-96 достоверно не отличается от аттестованного значения. Выполненная оценка отклонений результатов исследования от аттестованных значений позволяет сделать вывод о достоверности данных и возможности проведения дальнейшего анализа с целью получения объективных качественных и количественных характеристик стационарного поля нейтронного излучения аттестованного источника.

На рис.5а представлены результаты определения энергетических характеристик плотности потока нейтронного излучения в направле-

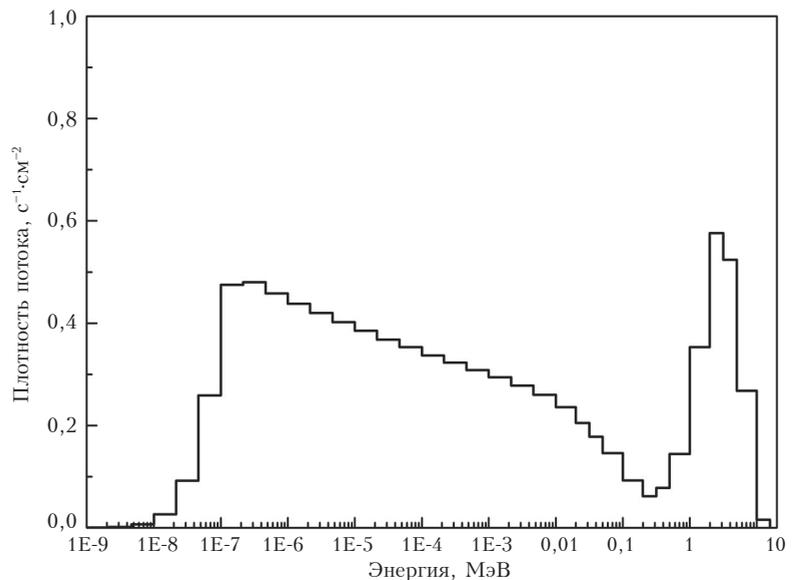


Рис.5в. Энергетическое распределение плотности потока нейтронного излучения в точке 35, находящейся за поверочной установкой вне пучка.

нии прямого воздействия пучка на расстоянии 1, 2, 3 и 4 метра от источника излучения, соответственно. Появление в правой части графика пика медленных нейтронов указывает на присутствие эффекта модерации даже в условно ближней зоне от источника нейтронов.

На рис.5б представлены результаты определения энергетических характеристик плотности потока нейтронного излучения в направлении, перпендикулярном прямому пучку, точки расположены на расстоянии 1, 2 и 3 метра от точки 1, соответственно. Наглядно видно усиление эффекта модерации в виде явного плато промежуточных нейтронов и пиков медленных нейтронов.

Наибольшее проявление эффекта модерации наблюдается в точках, находящихся в удалении от прямого пучка. Пример спектра рассеянных нейтронов представлен на рис.5в для точки 35.

Наблюдаемые на рис.5 проявления модерации нейтронов зависят от расстояния до источника нейтронов и от расположения точек относительно направления пучка нейтронов. Ожидаемо, эффект модерации усиливается

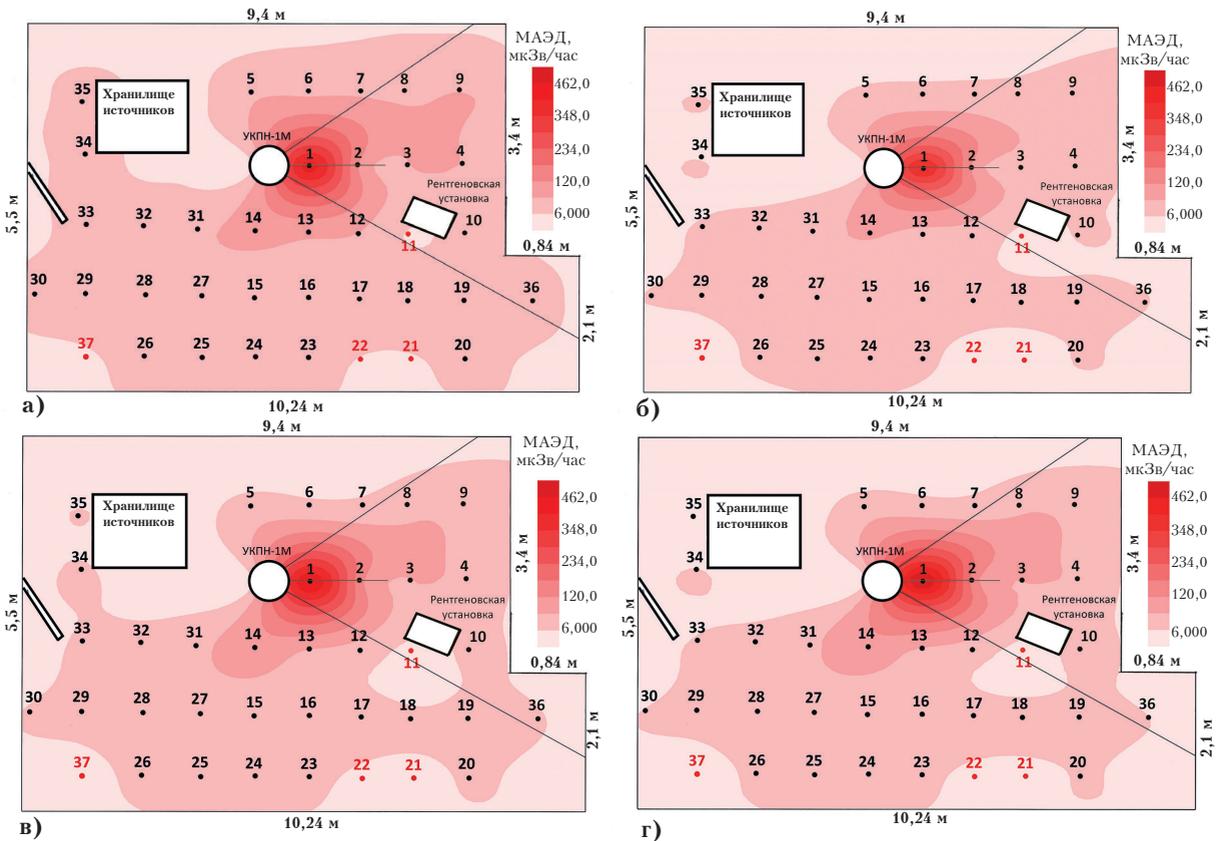


Рис. 6. Распределение МАЭД в помещении поверочной установки, измеренное с помощью дозиметров-радиометров: а) ДКС-96 с БДКН-96; б) ДКС-96 с БДМН-96; в) МКС-АТ1117М с БДКН-06; г) получен с использованием спектра по формуле (1).

в направлении, перпендикулярном направлению пучку нейтронов и на удалении от источника. При значительном удалении от источника увеличивается вероятность и частота упругих взаимодействий потока нейтронов с материалом стен (бетон), оборудования (железо), что приводит к потере нейтронами части энергии. Представленные на рис.5 графики воспроизводят ситуацию условий облучения на различных рабочих местах в полях нейтронного излучения, формируемого однотипными источниками, но с различным энергетическим распределением плотности потока [6-11].

Наблюдение снижения средней энергии спектра вследствие рассеяния нейтронов за счет увеличения вклада тепловых и промежуточных нейтронов позволяет предположить наличие неоднородных зон в исследуемом про-

странстве с различным вкладом в суммарный поток нейтронов выделенных трех энергетических групп. Вклад каждой группы нейтронов в плотность потока и МАЭД в каждой обследованной точке представлен в табл.3.

В выбранных для выполнения метрологической поверки радиометров и дозиметров нейтронного излучения точках 1 и 2, расположенных в ближней зоне прямого излучения, значение МАЭД нейтронного излучения обусловлено преимущественно быстрыми нейтронами (на ~94%) и промежуточными нейтронами (на ~4%). Вклад медленных нейтронов в величину МАЭД нейтронного излучения не превышает 0,3%. Некоторые СИ, поверенные на обследованной установке в указанных точках, будут воспроизводить адекватные результаты измерения МАЭД только на рабочих местах с аналогичным соотношением быстрых,

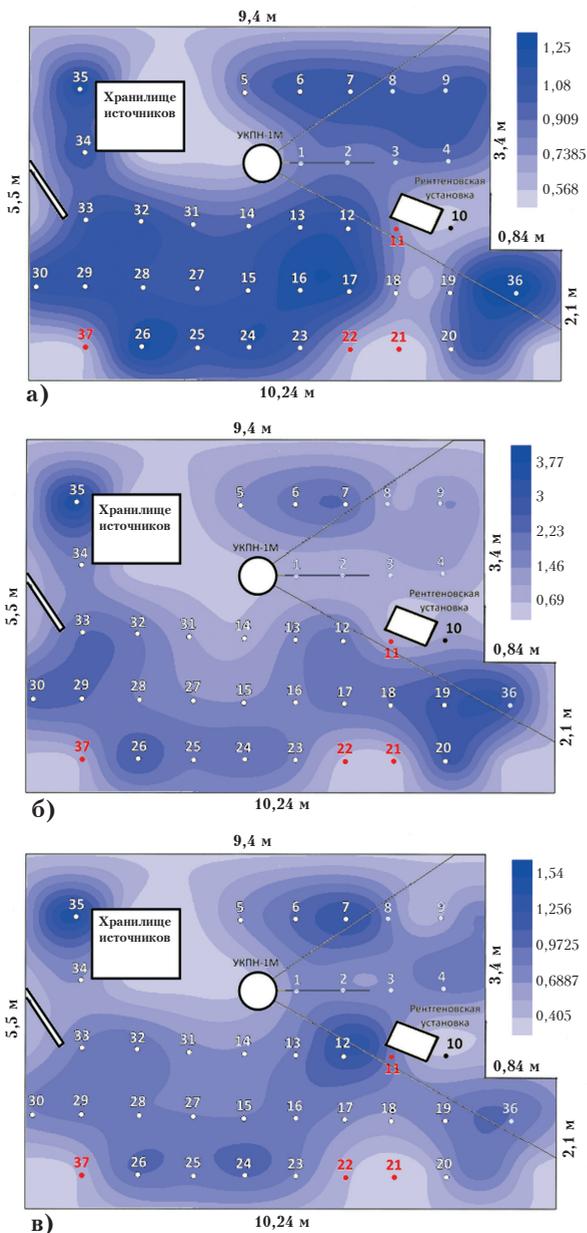


Рис. 7. Отношения результатов измерений МАЭД дозиметрами-радиометрами к истинному значению МАЭД: а) МКС-АТ1117М с БДКН-06; б) ДКС-96 с БДКН-96; в) ДКС-96 с БДМН-96.

промежуточных и медленных нейтронов. Для рабочих мест с другим соотношением вклада нейтронов энергетических групп в плотность потока и МАЭД требуется введение поправочных коэффициентов для таких СИ [6-11]. В качестве примера показательно результаты исследования в точке 35, где снижение вклада быстрых нейтронов в значение МАЭД на 8%

при одновременном увеличении вклада промежуточных (на ~7%) и медленных (на ~3%) нейтронов привело к практически четырехкратному завышению результата измерения МАЭД нейтронного излучения в сравнении с условно истинным значением, рассчитанным по формуле (4).

Полученные достоверные данные прямых измерений МАЭД различными средствами измерения, определение энергетических характеристик нейтронного излучения в различных точках пространства поверочной установки, расчет значений МАЭД по установленному энергетическому распределению нейтронного излучения позволяют провести анализ пространственных характеристик нейтронного поля поверочной установки. Результаты анализа необходимы для объективной оценки степени однородности в пространстве поля нейтронного излучения, определения факторов, влияющих на результаты измерения различных средств измерения в условиях изменения спектра энергий нейтронного потока.

Обсуждение

Результаты исследования наглядно демонстрируют влияние эффекта модерации на неоднородность стационарного поля нейтронного излучения по энергетическому распределению плотности потока в пространстве. В различных точках обследованного помещения поверочной установки вклад в плотность потока меняется:

- быстрых нейтронов в 3,7 раза – от 19 до 71%;
- промежуточных нейтронов в 2,3 раза – от 24 до 55%;
- медленных нейтронов в 7,4 раза – от 5 до 37%.

К основным факторам, усиливающим модерацию нейтронов, относятся: расстояние от источника нейтронов; расположение точки измерения относительно прямого пучка нейтронов;

наполнение пространства предметами и конструкциями из железа; геометрические характеристики и расположение строительных конструкций из бетона.

Установленная неоднородность стационарного поля излучения нейтронов, сформированного аттестованным ^{238}Pu - α -Be источником быстрых нейтронов, определяет отличие результатов прямых измерений значений МАЭД и условно истинных значений, рассчитанных на основании энергетического распределения плотности потока. Диапазон отличий от условно истинных значений МАЭД меняется:

- от 0,7 до 3,8 раза для результатов измерения ДКС-96 с БДКН-96;
- от 0,4 до 1,5 раз для результатов измерения ДКС-96 с БДМН-96;
- от 0,6 до 1,3 раза для результатов измерения МКС-АТ1117М с БДКН-06.

Исходя из апертуры угла диафрагмы, под действие прямого пучка источника нейтронов попадают следующие точки измерений: 1, 2, 3, 4, 8, 9, 10, 36. В остальных точках поле формируется нейтронами, рассеянными от стен, пола, потолка комнаты, от оборудования других установок, прошедших материал поверочной установки. Можно предположить дополнительный выход излучения нейтронов из хранилища источников для точек 34 и 35.

Карта распределения МАЭД нейтронного излучения представлена на рис.6., где отмечается повышенное значение МАЭД в точках 13 и 14 по сравнению с точками 5 и 6 (более чем в 2 раза), расположенных симметрично относительно направления распространения прямого пучка. Данное отклонение наблюдается в силу того, что открытие защитного контейнера поверочной установки происходит путем отодвигания заслонки влево (в направлении точек 5 и 6, рис.3), что создает дополнительную защиту от излучения в точках 5, 6 и увеличивает количество рассеянных нейтронов в точках 13, 14 и близлежащих к ней точках.

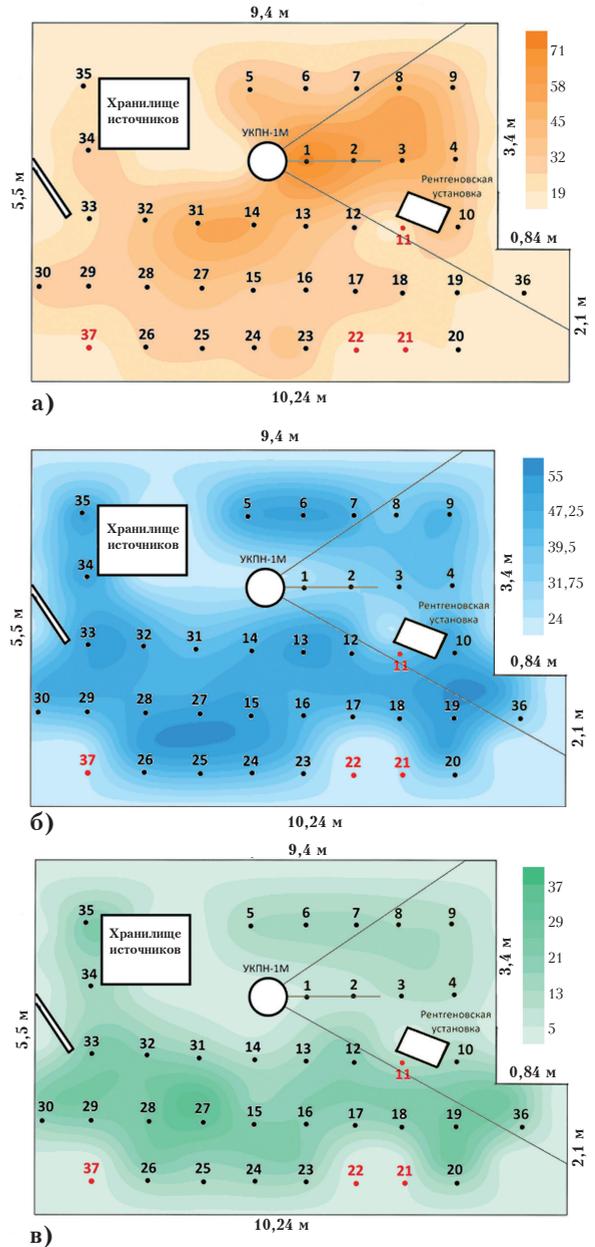


Рис.8. Вклады нейтронов различных энергий в плотность потока: а) быстрые нейтроны; б) промежуточные нейтроны; в) медленные нейтроны.

Предполагая, что МАЭД, рассчитанная по формуле (4) с использованием данных об энергетическом распределении плотности потока нейтронного излучения, отражает истинное значение, были рассчитаны отношения результатов измерений МАЭД дозиметрами-радиометрами к истинному значению МАЭД. Принимая во внимание предел допускаемой основной отно-

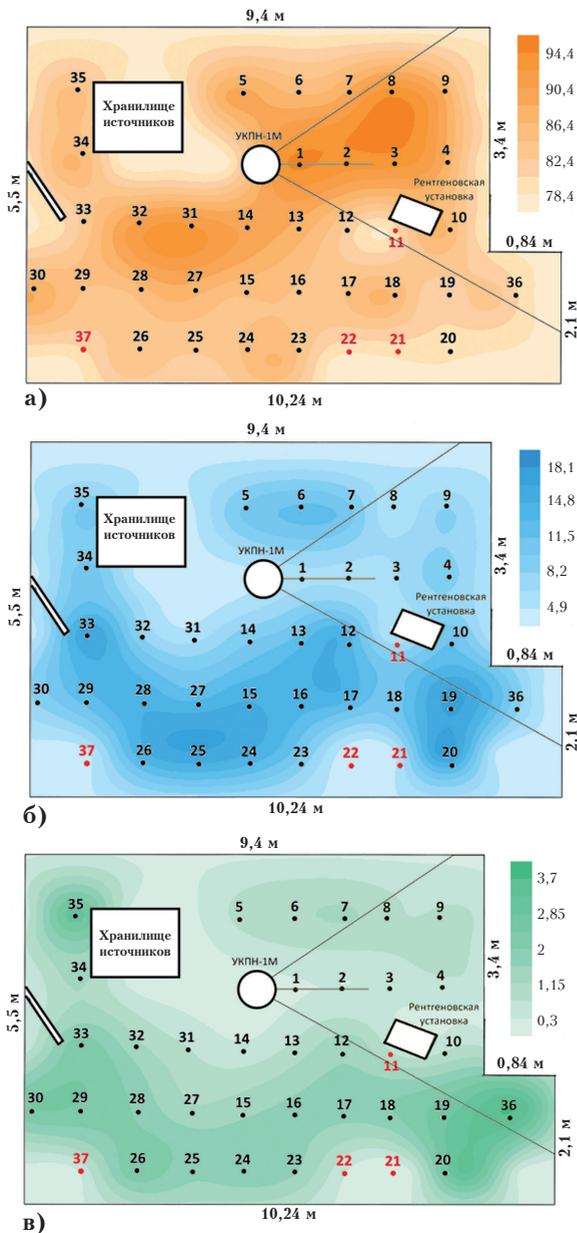


Рис.9. Вклады нейтронов различных энергий в мощность амбиентного эквивалента дозы: а) быстрые нейтроны; б) промежуточные нейтроны; в) медленные нейтроны.

сительной погрешности результата измерений МАЭД дозиметрами-радиометрами, выделен диапазон значений отношений, в пределах которого можно считать, что результат измерения соответствует истинному значению. Наглядно отношения представлены на рис.7.

Анализируя данные табл.1 и рис.8, можно увидеть, что только 20% результатов измере-

ний, полученных с помощью ДКС-96 с БДКН-96, соответствуют истинным значениям. Тот же показатель для ДКС-96 с БДМН-96 и МКС-АТ1117М с БДКН-06 составляет 80 и 87%, соответственно. Такое отличие результатов обуславливается преимущественно тем, что конструкция блока детектирования БДКН-96 предназначена для измерения МАЭД нейтронов только для источников быстрых нейтронов, характерных для $^{238}\text{Pu}-\alpha\text{-Be}$ источников. В полях непрямых пучков результаты измерений, полученные с применением данного блока детектирования, недооценивают или переоценивают истинное значение.

На рис.5а видно, что происходит интенсивное уменьшение пика быстрых нейтронов за счет геометрического ослабления излучения прямого пучка. На рис.5б наблюдается также геометрическое ослабление излучения в направлении, перпендикулярном прямому пучку. В точке, находящейся вдали и в противоположном направлении от прямого пучка источника, наблюдается типичный спектр рассеянного излучения, в котором присутствует пик быстрых нейтронов, вероятно, сформированный излучением, прошедшим через защитный контейнер поверочной установки, и излучением, прошедшим через защиту хранилища источников. Также в точке 35 наблюдается большое количество замедленных нейтронов, отраженных от прилегающих к точке поверхностей.

В поле прямого пучка при удалении от источника к передней стене комнаты наблюдается постепенное увеличение вклада медленных и промежуточных нейтронов в суммарную плотность потока; напротив, вклад быстрых нейтронов уменьшается. В точках, лежащих вне воздействия прямого пучка, вклад медленных нейтронов варьируется в диапазоне от 20 до 37%. Исключение составляют точки 13, 14 и 31, где имеет влияние отражение излучения от заслонки защитного контейнера, а также

испускание излучения источника через технологические зазоры и неоднородности в защитном контейнере.

Наглядная демонстрация вкладов нейтронов различных энергий в плотность потока представлена на рис.8, а в мощность амбиентного эквивалента дозы – на рис.9.

Вне прямого пучка и за исключением аномальных точек вклад нейтронов промежуточных энергий лежит в пределах $50 \pm 3\%$. Вклад быстрых нейтронов в поле рассеянного излучения вблизи стен составляет $26 \pm 5\%$, а вклад медленных – $23 \pm 4\%$.

Выводы

Проведены исследования полей нейтронного излучения, формируемых вокруг поверочной установки УКПН-1М. В помещении поверочной установки выделены 37 точек, в 33 из которых проведены измерения МАЭД и энергетического распределения плотности потока нейтронного излучения. Установлено, что только 20% результатов измерений, полученных с помощью ДКС-96 с БДКН-96, соответствуют истинным значениям; тот же показатель для ДКС-96 с БДМН-96 и МКС-АТ1117М с БДКН-06 составляет 80 и 87%, соответственно. Дозиметры-радиометры ДКС-96 с БДМН-96 и МКС-АТ1117М с БДКН-06 могут применяться для измерения дозиметрических величин в широком энергетическом диапазоне нейтронного излучения – от тепловых до быстрых. Дозиметр-радиометр ДКС-96 с БДКН-96 может применяться только в полях прямого пучка источника быстрых нейтронов. Результаты измерений дозиметрами-радиометрами ДКС-96 с БДМН-96 и МКС-АТ1117М с БДКН-06 согласуются между собой на 97%.

Технологическое оборудование поверочной установки имеет влияние на формирование поля нейтронного излучения за пределами действия прямого пучка. Наличие заслонки, располагающейся слева от защитного контейнера во время работы поверочной установки, приводит к увеличению МАЭД в направлении, перпендикулярном направлению распространения пучка. В некоторых случаях (например, ручное управление заслонкой поверочной установки) это может приводить к дополнительному облучению персонала.

В поле прямого излучения ^{238}Pu - α -Be источника нейтронов вклад быстрых нейтронов в формирование МАЭД составляет не менее 90%. Пользователям средств измерения МАЭД и плотности потока нейтронного излучения целесообразно обращать внимание на данные о вкладе быстрых, промежуточных и медленных нейтронов при метрологической поверке. В случае существенного отличия распределения вклада нейтронов указанных энергетических групп в плотность потока и МАЭД на обследуемых рабочих местах от условий проведения метрологической поверки, требуется введение поправочных коэффициентов.

Однотипные стационарные источники нейтронов в различных внешних условиях (геометрия помещения, наполнение конструкциями и оборудованием) будут создавать поля нейтронного излучения с различными характеристиками энергетического распределения плотности потока нейтронного излучения в пространстве, что может потребовать применение различных поправочных коэффициентов к результатам прямых измерений МАЭД на производственных объектах и/или для индивидуальных дозиметров.

Литература

1. Горин Н.В., Екидин А.А., Головихина О.С. Атомная энергетика в национальных проектах России // Известия высших учебных заведений. Ядерная энергетика. 2021. № 1. С. 5-15.
2. Общие принципы радиационной защиты персонала. Публикация 75 МКРЗ. Екатеринбург. УРАЛРЭСЦЕНТР, 1999.
3. Радиационная защита и безопасность источников излучения: международные основные нормы безопасности. Общие требования безопасности. Серия норм безопасности МАГАТЭ № GSR, часть 3, МАГАТЭ, Вена, 2015.
4. Федеральный закон от 26.06.2008 № 102-ФЗ «Об обеспечении единства измерений».
5. Указ Президента РФ от 13 октября 2018 г. № 585 «Об утверждении Основ государственной политики в области обеспечения ядерной и радиационной безопасности Российской Федерации на период до 2025 года и дальнейшую перспективу».
6. Екидин А.А., Поваров В.П., Росновский С.В. и др. Совершенствование системы дозиметрического контроля нейтронного облучения персонала Нововоронежской атомной станции // Известия высших учебных заведений. Ядерная энергетика. 2023. № 1. С. 82-95.
7. M. Pyshkina, A. Vasilyev, A. Ekidin et al. «Study of neutron energy and directional distribution at the Beloyarsk NPP selected workplaces», *Nuclear Engineering and Technology*, 2020. P. 015.
8. Пышкина М.Д., Никитенко В.О., Жуковский М.В., Екидин А.А. Неопределенность результатов измерений индивидуальных дозиметров нейтронного излучения на рабочих местах // АНРИ. 2018. № 4(95). С. 15-23. URL: <https://www.doza.ru/anry/archive/95/1523.pdf> (дата обращения: 24.09.2022).
9. Пышкина М.Д., Васильев А.В., Екидин А.А. и др. Дозиметрия нейтронного излучения на рабочих местах персонала АО «Институт реакторных материалов» // Радиационная гигиена. 2021. Т. 14. № 2. С. 89-99.
10. Алексеев А.Г., Пикалов В.А., Алексеев П.А. Поправочные коэффициенты при измерении мощности амбиентного эквивалента дозы нейтронов // АНРИ. 2021. № 4(107). С. 32-40.
11. Пышкина М.Д., Васильев А.В., Екидин А.А. и др. Профессиональное облучение нейтронами на Белоярской АЭС // АНРИ. 2021. № 3(106). С. 16-26.
12. INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Neutron Monitoring for Radiation Protection, Safety Reports Series no. 115, IAEA, Vienna, 2023.
13. V. Gressier et al. «Characterisation of the IRSN CANEL/T400 facility producing realistic neutron fields for calibration and test purposes», *Radiat. Prot. Dosim.*, № 110, pp. 523-527, 2004.
14. Методика поверки нейтронных дозиметров в коллимированном пучке МИ 172-78.
15. International standard ISO 8529. – Switzerland: International Standard Organization, 2021.
16. Приложение к свидетельству № 43717 об утверждении типа средства измерения. Дозиметры-радиометры ДКС-96.
17. AT1117M Radiation Monitor. URL: https://atomtex.com/sites/default/files/datasheets/at1117m_all_options_0.pdf (дата обращения: 2.12.2024).
18. M. Pyshkina, A. Vasilyev, A. Ekidin, M. Zhukovsky. Development and testing of a neutron radiation spectrometer in fields of radionuclide sources. AIP Conference Proceeding.
19. R. Bedogni, C. Domingo, A. Esposito, F. Fernandez. FRUIT: An operational tool for multisphere neutron spectrometry in workplaces. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, vol. 580, pp. 1301-1309.
20. Радиационная безопасность. Рекомендации Междунар. комис. по радиол. защите 1990 г. Публ. 60 МКРЗ, ч. 2. Приняты МКРЗ в нояб. 1990 г. Пер. с англ. Кузьминой Т.Д. Под ред. Кеирим-Маркуса И.Б. М.: Энергоатомиздат, 1994. 207 с.
21. Публикация 103 Международной Комиссии по радиационной защите (МКРЗ). Пер с англ. под общей ред. Киселева М.Ф. и Шандалы Н.К. М.: Изд. ООО ПКФ «Алана», 2009.

Spatial Distribution of Characteristics of the Inhomogeneous Stationary Field of Fast Neutron Source

Pyshkina Maryia¹, Vasilyev Aleksey¹, Ekinin Aleksey¹, Nazarov Evgeniy¹, Mishchenko Lubov², Furtikova Olesya³

¹ Institute of Industrial Ecology UrO RAS, Yekaterinburg, Russia

² FBU Uraltest, Yekaterinburg, Russia

³ LLC «АЭБ «Альфа-Кх91», Yekaterinburg, Russia

Abstract. The results of the study of the stationary field of neutron radiation of the verification installation UKPN-1M under normal operating conditions are presented. The influence of reflecting and absorbing surfaces, materials of structures, equipment, and tooling on the moderation of the neutron energy spectrum is demonstrated. In certain points of the location space of the UKPN-1M, the proportion of thermal neutrons in the energy spectrum increases by a factor of 7,5 and the proportion of intermediate energy neutrons doubles. For these local areas of space, the contribution to the equivalent absorbed dose in tissue of thermal neutrons increases from 0,3% to 3,7%, and for intermediate energy neutrons from 5,9% to 18,1% compared to areas of space without the moderation effect of the neutron energy spectrum by surrounding materials. The moderation effect of the neutron flux leads to an overestimation of the results of measuring the equivalent absorbed dose in tissue of neutron radiation compared to the calculated value of the equivalent absorbed dose by the energy spectrum by factors of 3,77, 1,54, and 1,25 respectively for DCS-96 with BDCN-96, DCS-96 with BDMN-96, and MKS-AT1117M with BDCN-06.

Keywords: *neutron radiation, spectra, moderation, dose rate, measuring instruments, metrology.*

М.Д.Пышкина (к.т.н., н.с.)¹, А.В.Васильев (к.т.н., с.н.с.)¹, А.А.Екидин (к.ф.-м.н., в.н.с.)¹, Е.И.Назаров (к.т.н., зав.лаб.)¹, Л.А.Мищенко (инж.)², О.И.Фуртикова (менеджер)³

¹ Институт промышленной экологии УрО РАН, г. Екатеринбург

² ФБУ Уралтест, г. Екатеринбург

³ ООО «АЭБ «Альфа-Х91», г. Екатеринбург

Контакты: maria1pyshkina@gmail.com, тел. +7 (912) 667-71-69

Твердотельные детекторы оптических сигналов и радиации

Часть 1.2. Обзор конструкций и характеристик детекторов (продолжение)

В продолжении первой части обзора [1] рассматривается дальнейшая история разработок твердотельных детекторов и особенности их конструкций. Основное внимание уделяется лавинным фотодиодам и кремниевым фотоумножителям, которые являются наиболее чувствительными и потому наиболее востребованными твердотельными детекторами малофотонных оптических сигналов и радиации.

Ключевые слова:

фотоэффект, фотодиод, лавинный фотодиод (ЛФД), гейгеровский ЛФД, однофотонный ЛФД, кремниевый фотоумножитель.

С.Л.Виноградов

Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН,
г. Москва

НПП «Доза», г. Зеленоград

Твердотельные фотодетекторы с пространственным разрешением
Общая цель разработок таких фотодетекторов – достичь максимального пространственного разрешения, обеспечить и большое число пикселей, и большую площадь матрицы, а также быстрое считывание информации со всех пикселей, и все это в сочетании с высокой пороговой чувствительностью.

Приборы с зарядовой связью

Прибор с зарядовой связью – ПЗС или ПЗС-матрица (charge coupled device, CCD) была изобретена в Bell Labs У.С. Бойлом и Г.Е. Смитом в 1969 году [2]. Применение ПЗС в качестве детектора изображений было очевидно, как уже в 1970 году сообщили Томпсетт, Амелио и Смит [3]. Первые ПЗС использовали сильно обедненную МОП-структуру р-типа проводимости и были очень шумными от большого темнового тока из-за

генерации электронов дефектами на границе раздела Si-SiO₂. Поверхностные дефекты были причиной не только темновой генерации, но также захвата и рекомбинации электронов на них в процессе переноса сигнального заряда вдоль поверхности Si-SiO₂.

Чтобы избежать влияния ловушек на интерфейсе Si-SiO₂, особенно на эффективность передачи заряда, в Bell Labs была разработана ПЗС-матрица со скрытым каналом – глубокой диффузией n+ типа в эпитаксиальном слое р-типа, которая сформировала потенциальную яму для электронов на некотором удалении от поверхности Si-SiO₂ [4], как проиллюстрировано на рис. 1.

В ранних ПЗС-матрицах использовалась полнокадровая архитектура. Это означает, что ПЗС-ячейка служит и фотоприемником (в то время как сигналы синхронизации ПЗС-матрицы «замораживаются» во время интегрирования), и областью передачи заряда, через которую проходят сигнальные зарядовые пакеты от других пикселей. Потенциальные ямы, хранящие сигнальные электроны в каждом пикселе, полностью исчерпываются в начале каждого периода интегрирования. Последовательный перенос заряда между ячейками в трехтактном режиме работы ПЗС показан на рис. 1. Далее, в выходном усилителе обычно используется алгоритм коррелированной двойной выборки для подавления шума считывания *kTC*.

Несмотря на множество проблем с темновым шумом и шумом считывания, неэффективностью и задержками переноса заряда, большой площадью нечувствительной области, занятой управляющими металлическими шинами к каждой ячейке матрицы, изобретение ПЗС стало революцией в области электронной визуализации оптических изображений. Невероятно, но эти недостатки были практически устранены в ходе оптимизации конструкций ПЗС с 1980-х по 2000-е гг.

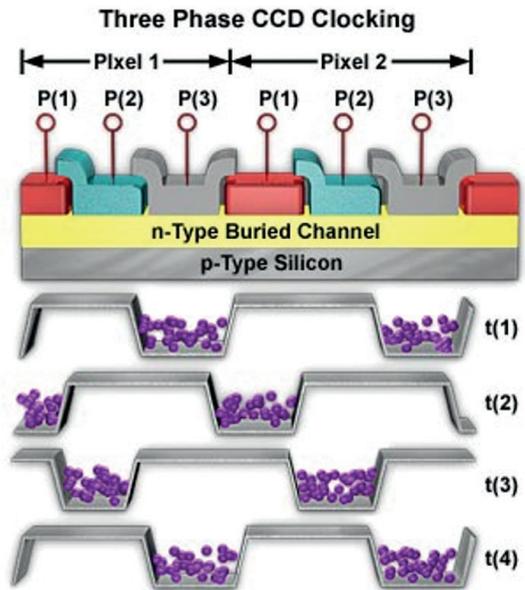


Рис. 1. Конструкция и принцип работы ПЗС (<https://hamamatsu.magnet.fsu.edu/articles/threephase.html>).

Одним из ключевых элементов оптимизации стала конструкция фотодиода с закреплением (фиксацией) уровня Ферми (pinned photodiode, PPD), разработанная Нобукадзу Тераниши с коллегами из компании NEC в 1980 г. [5]. Этот фотодиод служил фоточувствительной ячейкой матрицы изображений, в которой накапливались фотоэлектроны в процессе регистрации света, и он был так встроен в МОП-структуру, что область накопления электронов n-типа была полностью изолирована от поверхности Si-SiO₂ высоколегированным слоем р+ типа (pinning layer), что позволяло полностью блокировать влияние поверхностных дефектов на работу фотодиода. Потенциал в яме накопления также был зафиксирован и не управлялся внешним затвором, а считывание заряда накопленных электронов осуществлялось в электрод стока n+ типа (floating diffusion) при подаче напряжения на полевой затвор переноса (transfer gate), как показано на рис. 2.

Стоит отметить количественный результат этих усилий в понижении темнового шума:

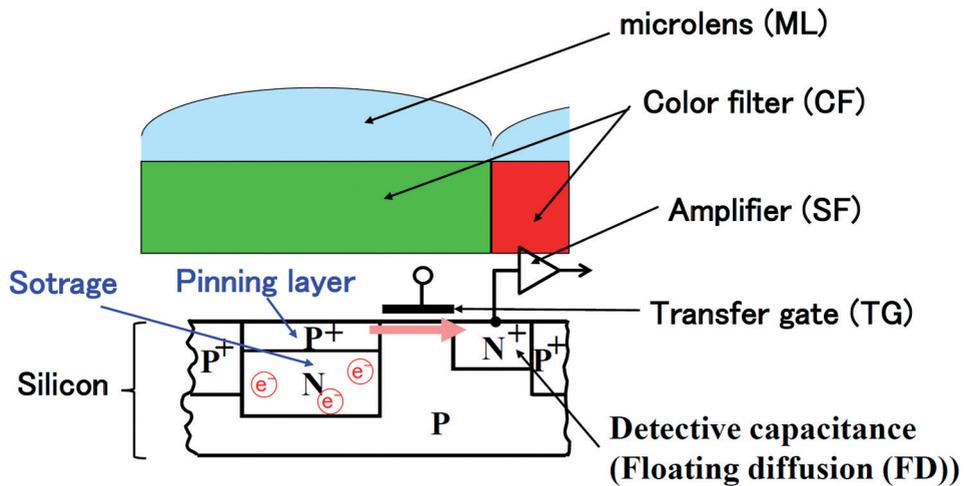


Рис.2. Конструкция КМОП-матрицы изображений на основе фотодиода с закреплением уровня Ферми [5].

если первые ПЗС с поверхностным каналом имели темп темновой генерации около $30 \text{ МГц}/\text{мм}^2$, то ПЗС со скрытым каналом – $0,6 \text{ МГц}/\text{мм}^2$, а ПЗС на основе фотодиода с закреплением уровня Ферми – $25 \text{ кГц}/\text{мм}^2$ [5].

КМОП-матрицы

Современный тип КМОП-матрицы изображений был разработан Эриком Фоссумом с коллегами из NASA Jet Propulsion Laboratory в 1993 г. [6]. В нем удачные разработки прошлых лет – фотодиод с закреплением уровня Ферми и активный усилитель зарядового сигнала на полевых транзисторах (active pixel sensor) – сочетались с использованием новых в тот момент возможностей КМОП-технологии по высокой степени интеграции и плотности элементов больших интегральных схем.

Дальнейшие улучшения параметров относились к одновременному повышению пространственного разрешения (плотности пикселей) и квантовой эффективности матриц.

Размеры пикселей удалось снижать в течение многих лет со средней скоростью около 50% за 3,5 года – от сотен микрон в 1980-х гг. до около 1 мкм в 2010-х гг. благодаря разви-

тию КМОП-технологии. Вместе с размером снижалась и емкость пикселя, и шум считывания $\sim kTC$, в результате этот шум был снижен примерно до среднеквадратичного значения в несколько электронов на пиксель.

Проблема эффективности на малых пикселях сначала была частично решена за счет использования микролинз на фронтальной поверхности матриц (рис.2), что дало повышение эффективности с 30% до 60–80%. Затем – за счет перехода к технологии ввода света с обратной стороны, т. е. со стороны кремниевой подложки, сошлифованной до микронных толщин, что дало повышение геометрической эффективности почти до 100%, при этом квантовая эффективность превысила 90% (рис.3).

Квантовый сенсор изображений

Очевидное понижение шумов пикселя ПЗС и КМОП матрицы с уменьшением размера пикселя и, соответственно, его емкости, до некоторых пор оставалось просто количественным улучшением параметров, пока дело не дошло до уровня шума в единицы электронов в начале 2000-х гг. Вместе с тем, дальнейшее уменьшение пикселей до размеров менее 1,0–1,5 мкм казалось бессмысленным, так как пространственное разрешение такой матрицы

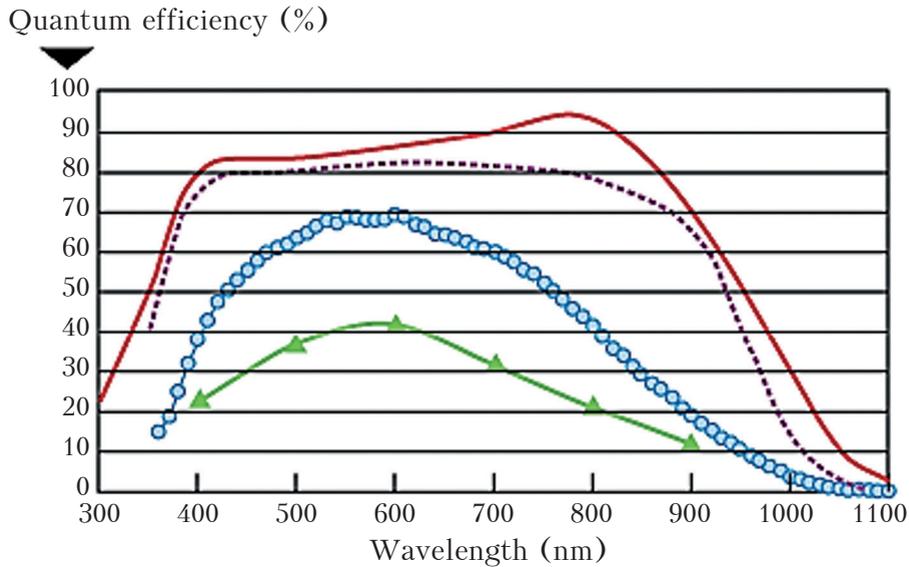


Рис. 3. Квантовая эффективность основных типов КМОП-матриц-изображений в видимом диапазоне спектра (снизу вверх): треугольники – фронтальное освещение без микролинз, круги – фронтальное освещение с микролинзами, пунктирная линия – обратный ввод света со стороны подложки, сплошная линия – конструкция IMES обратным вводом света с рекордной эффективностью [7].

приближалось к ограничению дифракционным пределом оптики для видимого света. Тем не менее, Эрик Фоссум, с его опытом разработки КМОП-сенсоров, признал разработку матрицы пикселей субмикронного размера очень перспективным подходом к получению изображений с разрешением по числу фотонов без усиления. В 2005 г. он предложил концепцию квантового сенсора изображения (quantum image sensor, QIS) [8]. Он предположил, что на горизонте 10–15 лет прогресс в КМОП-технологии позволит создавать пиксели с субдифракционным пределом (так называемые, jots), а прогресс в разработке схем мультиплексирования сигналов КМОП-матриц позволит обеспечить их считывание с достаточной кадровой частотой при допустимом уровне потребляемой мощности. Первые результаты работы матрицы из нескольких пикселей были продемонстрированы в 2015 и 2016 гг. со среднеквадратичным значением шума 0,28 и 0,22 электрона на пиксель, соответственно [9,10], как показано на рис.4.

Однако несмотря на выдающийся успех в прототипировании, разработка квантового сенсора изображений, представляющего практический интерес, является сложнейшей задачей и по технологии, и по системной архитектуре из-за гигапиксельных масштабов матрицы и ее перегруженности металлическими шинами управления пикселями (т. е. с очень низкой геометрической эффективностью). Тем не менее, работы по прототипам с ограниченной функциональностью продолжают. Так, в 2017 году были представлены результаты по матрице 1024×1024 с шагом в 1,1 мкм (Megajot QIS) со среднеквадратичным значением шума ~0,2 электрона на пиксель [11]

ПЗС-матрицы с лавинным умножением

Идея использовать лавинное умножение зарядового пакета в матрицах изображений появилась в ходе работ по оптимизации ПЗС-матриц. Это полностью аналогично переходу от фотодиодов к ЛФД для повышения пороговой чувствительности за счет того, что умноженный сигнал становится выше шума электроники и может быть зарегистрирован (рис.5).

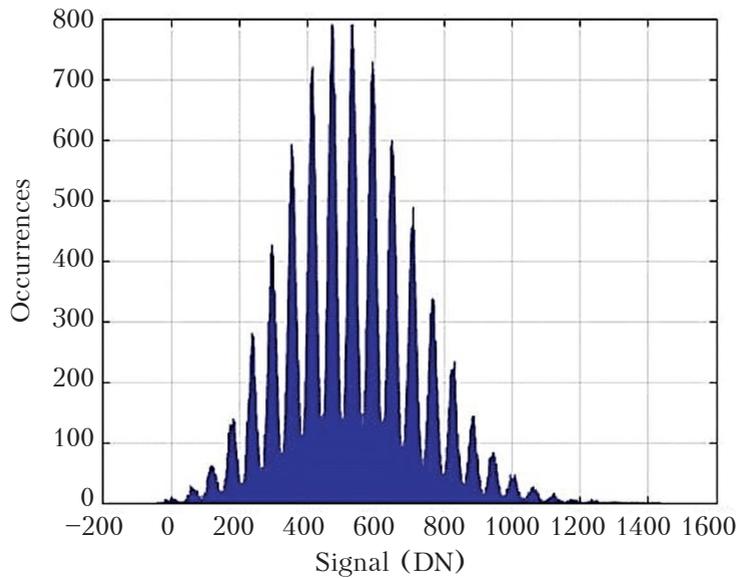


Рис.4. Гистограмма сигнала пикселей (спектр фотоэлектронов) квантового сенсора изображений, работающего без лавинного умножения [10].

Лавинные ПЗС-матрицы (Electron Multiplying CCD, EMCCD) были запатентованы в 1973 г. Дж. Смитом из Bell Laboratories, а разработаны и выпущены на рынок в начале 1990-х гг. компаниями e2v (Великобритания) и Texas Instruments (США). Слабое лавинное умножение при переносе заряда в каждом пикселе, даже с весьма малым коэффициентом и малой вероятностью лавины, оказалось весьма эффективным при большом числе пикселей, порождая в итоге тысячи электронов на

выходе на один первичный фотоэлектрон, что существенно подавило шум считывания [12].

В видеокамерах с охлаждением лавинной ПЗС-матрицы, которые выпускаются, например, компанией Andor Technologies с 2001 г., уровень шума лежит в диапазоне от долей до единиц электронов на пиксель, соответственно, при шуме менее 1 электрона может быть реализован режим однофотонного детектирования, а квантовая эффективность в видимой области спектра составляет от 60% до 95%.

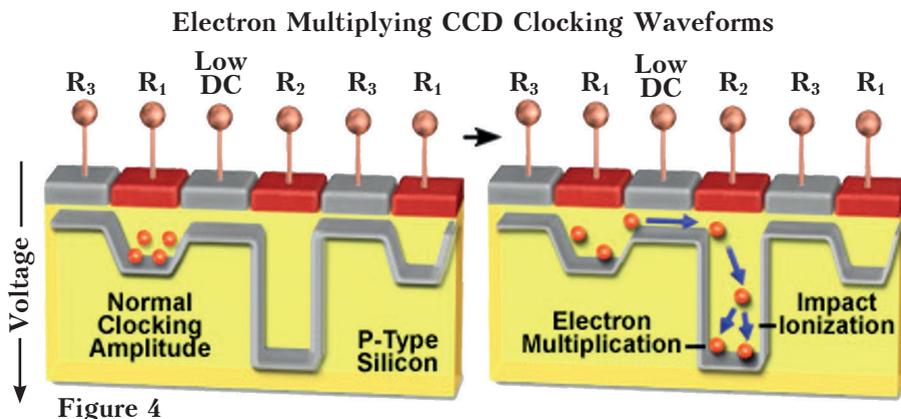


Рис.5. Принцип работы лавинной ПЗС-матрицы (<https://hamamatsu.magnet.fsu.edu/articles/emccds.html>).

Матрицы однофотонных гейгеровских ЛФД (SPAD)

Одноэлементный однофотонный ЛФД может иметь высокую PDE ~75–80% (как обсуждалось ранее на примере Single Photon Counting Module SPCM-AQR Series [19]). Однако при создании матрицы ЛФД возникают проблемы с геометрической эффективностью: активная область каждого пикселя матрицы – однофотонного ЛФД – окружена нечувствительной областью, занятой электроникой для активного гашения гейгеровского пробоя, управления и считывания сигналов этого пикселя (рис.6).

Эта проблема до сих пор окончательно не решена в традиционной технологии 2D-интеграции элементов, хотя создание высокоэффективных матриц однофотонных ЛФД стала приоритетной с 1990-х гг., когда были разработаны одноэлементные ЛФД с хорошими показателями качества.

Надо отметить, что даже в разработках 2010-х гг. геометрическая эффективность редко превышала 10–20%. Поэтому эффективность регистрации фотонов оказывалась очень низкой, например, ~3% в проекте MISPIA (микроэлектронная однофотонная матрица 3D-изображений, разработана Миланским политехническим университетом и институтом микроэлектроники Фраунгофера в Мюнхене, <http://www.everyphotoncounts.com/mispia/>), ~5% в проекте NUV PET (матрица SwissSPAD, разработана лабораторией Aqua Lab, EPFL в Лозанне, <https://aqua.epfl.ch/>).

Заметным успехом в части геометрической эффективности стала разработка цифрового кремниевого умножителя (digital SiPM, фактически это матрица SPAD с особой группировкой и мультиплексированием ЛФД пикселей) Томасом Фрачем с коллегами из компании Philips [20]. Оставаясь в рамках технологии 2D-интеграции, при размерах пикселей

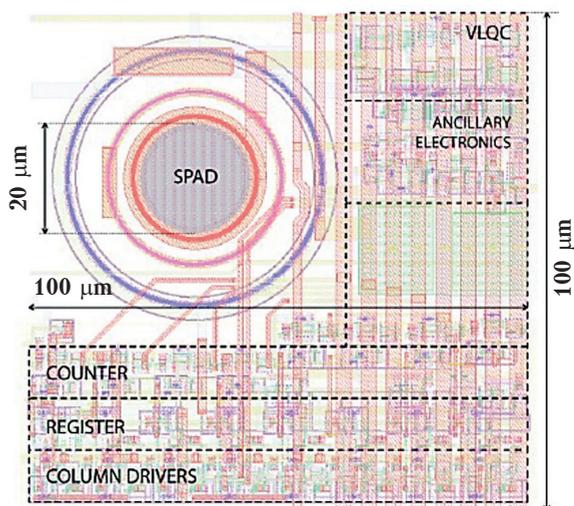


Рис.6. Внешний вид одного элемента матрицы однофотонных ЛФД (SPAD) с геометрической эффективностью 3% [13].

52×30 мкм, они добились геометрической эффективности ~50% и PDE ~30% для синего света.

Позиционно-чувствительные кремниевые фотоумножители

В кремниевых фотоумножителях вместо активного гашения гейгеровского пробоя специальной электронной схемой, размещенной рядом с лавинным пикселем (как в SPAD), применяется пассивное гашение, что почти не ухудшает геометрическую эффективность и дает большие преимущества по PDE, а также перед матрицами ЛФД (если не требуется пространственное разрешение). Однако в обычной конструкции кремниевых фотоумножителей пиксели подключены параллельно в цепь между катодом и анодом, что не позволяет получить информацию о сработавшем пикселе, его координатах. На это обратили внимание ряд разработчиков SiPM и предложили несколько типов позиционно-чувствительных кремниевых фотоумножителей (position-sensitive SiPM, PS SiPM):

- интерполирующий SiPM [14];
- линейно-градиентный SiPM [15];
- PS SiPM с декодированием позиционной чувствительности [16];

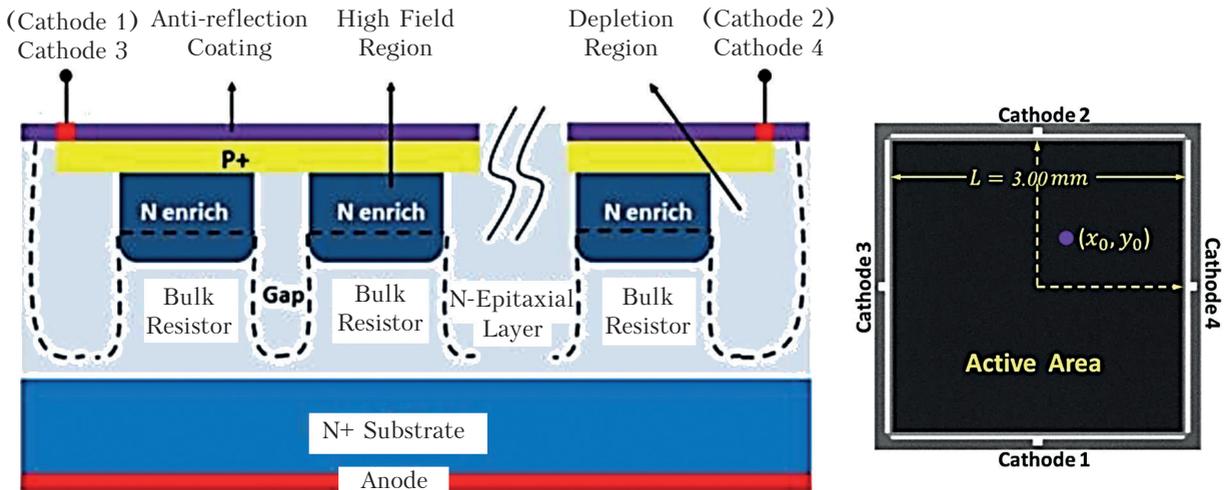
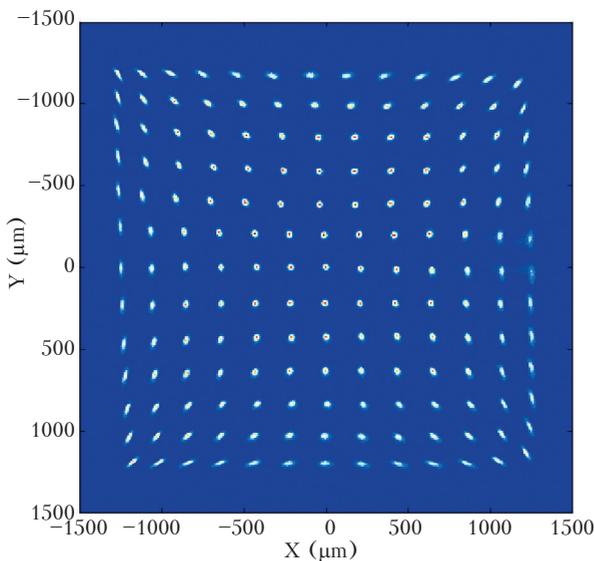


Рис.7. Конструкция позиционно-чувствительных кремниевых фотоумножителей лаборатории NDL [21].

• PS SiPM со сплошным резистивным слоем [17].

Большинство из них не дали известного практического результата (возможно, все еще находятся в процессе разработок). Однако



Reconstruction of 13×13 incident light spot positions with MPEN ~15 and the diameter of the light spot is ~80 μm.

$$PR_{\text{System-X}} = 34,9 \pm 10,3 \mu\text{m},$$

$$PR_{\text{System-Y}} = 40,1 \pm 12,7 \mu\text{m}$$

Рис.8. Пространственное разрешение PS SiPM размером 3×3 мм лаборатории NDL [18].

разработка лаборатории New Device Laboratory (NDL, Пекин, Китай) оказалась весьма успешной [17,18]. NDL разработала новую конструкцию SiPM с эпитаксиальными гасящими резисторами, расположенными непосредственно под пикселями и представляющими собой необходимую часть эпитаксиального слоя. Для позиционной чувствительности пиксели подключены к четырем катодам, расположенным по сторонам SiPM, с помощью сплошного поверхностного резистивного слоя, что дает зарядовое деление сигнала на 4-х электродах (рис.7).

Образцы NDL демонстрируют высокое пространственное разрешение (для размеров SiPM 3×3 мм) около 40 мкм при детектировании импульсов света со средним числом фотоэлектронов около 15 в пятне диаметром около 80 мкм (рис.8). Суммарный сигнал со всех катодов, как и сигнал обычных SiPM, обеспечивает очень хорошее разрешение числа фотоэлектронов вплоть до 24-го пика спектра.

Таким образом, кремниевые фотоумножители с позиционной чувствительностью могут быть альтернативой матрицам SPAD по пространственному разрешению, заметно превосходя их по эффективности детектирования фотонов PDE.

Заключение

Развитие различных типов твердотельных фотодетекторов долгое время шло независимо, иногда даже в противоположных направлениях, как например, для линейных ЛФД стремились достичь максимально большой чувствительной площади (сантиметры), а для пикселей ПЗС и КМОП-матриц – минимальной (микроны). Конструкции и технологии по каждому из направлений были доведены до массового выпуска приборов в конкретных прикладных задачах. Естественно, что универсального фотодетектора, решающего любую задачу с высокими показателями качества, разработано не было.

Но стоит отметить, что вместе с развитием функционала и возможностей фотодетекторов

расширялись и области их применения, и при этом более перспективными оказывались не классические типы конструкций, а новые их варианты на основе сочетаний преимуществ разных типов, как, например, ПЗС-матрицы с лавинным умножением, позиционно-чувствительные SiPM. Аналогично, мы видим быстрый прогресс в приближении цифровых SiPM и SPAD-матриц к сенсорам изображений на основе ПЗС и КМОП-матриц.

Тем не менее, мы предполагаем, что аналоговый SiPM еще многие годы будет наиболее востребованным малофотонным твердотельным фотодетектором в крупных экспериментах в физике высоких энергий и астрофизике, медицине, системах безопасности и других.

Литература

1. Виноградов С.Л. Твердотельные детекторы оптических сигналов и радиации. Часть 1.1. Обзор конструкций и характеристик детекторов // АНРИ. 2024. № 4(119). С. 13-27.
2. W.S. Boyle, G.E. Smith, «Charge Coupled Semiconductor Devices», *Bell Syst. Tech. J.*, vol. 49, pp. 587-593, 1970. Doi: 10.1002/j.1538-7305.1970.tb01790.x.
3. M.F. Tompsett, G.F. Amelio, G.E. Smith, «Charge coupled 8-bit shift register», *Appl. Phys. Lett.*, vol. 17, pp. 111-115, 1970. Doi: 10.1063/1.1653327.
4. R.H. Walden, R.H. Rambeck, at all, «The Buried Channel Charge Coupled Device», *Semicond. Devices Pioneer. Pap.*, World Scientific, pp. 577-582, 1991. Doi: 10.1142/9789814503464_0075.
5. N. Teranishi, «Recent Progresses of Visible Light Image Sensors», *Cern Detect. Semin.*, 2018. URL: https://indico.cern.ch/event/706286/attachments/1601588/2547606/20180223CERN_ver2.pdf (дата обращения: 9.01.2025).
6. E.R. Fossum, «CMOS image sensors: electronic camera on a chip», *Proc. Int. Electron Devices Meet., IEEE*, pp. 17-25, 1995. Doi: 10.1109/IEDM.1995.497174.
7. Y. Bai, J. Bajaj at all, «Teledyne Imaging Sensors: silicon CMOS imaging technologies for X-ray, UV, visible, and near infrared», *D.A. Dorn, A.D. Holland (Eds.)*, *Proc. SPIE 7021, High Energy, Opt. Infrared Detect. Astron. III*, 16 pp., 2008, 702102. Doi: 10.1117/12.792316.
8. E.R. Fossum, «What to Do with Sub-Diffraction-Limit (SDL) Pixels? – A Proposal for a Gigapixel Digital Film Sensor (DFS)», *ISSCC Dig. Tech. Pap.*, 2005. <http://ci.nii.ac.jp/naid/10017286603/en/> (accessed November 8, 2018).
9. J. Ma, D. Starkey and all, «Characterization of Quanta Image Sensor Pump-Gate Jots With Deep Sub-Electron Read Noise», *IEEE J. Electron Devices Soc.* 3, pp. 472-480, 2015. Doi: 10.1109/JEDS.2015.2480767.
10. E. Fossum, J. Ma, at all, «The Quanta Image Sensor: Every Photon Counts», *Sensors*, vol. 16, 2016. Doi: 10.3390/s16081260.
11. J. Ma, S. Masoodian, at all, «Photon-number-resolving megapixel image sensor at room temperature without avalanche gain», *Optica*, vol. 4, pp. 1474, 2017. Doi: 10.1364/OPTICA.4.001474.

12. N. Smith, C. Coates, et al., «EMCCD technology and its impact on rapid low-light photometry», *Opt. Infrared Detect. Astron.*, vol. 162, pp. 5499, 2004. Doi: 10.1117/12.549789.
13. I. Rech, A. Gulinatti et al., «High-performance silicon single-photon avalanche diode array», *Proc. SPIE.*, vol. 7320, pp. 73200H-73200H-12, 2009. Doi: 10.1117/12.818516.
14. I. Sacco, P. Fischer, A. Gola, C. Piemonte, «Interpolating Silicon Photo-Multiplier: A novel position sensitive device with submillimeter spatial resolution and depth of interaction capability», *IEEE Nucl. Sci. Symp. Med. Imaging Conf.*, (2013 NSS/MIC), IEEE, pp. 1-3, 2013. Doi: 10.1109/NSSMIC.2013.6829589.
15. A. Ferri, F. Acerbi, et al., «Characterization of Linearly Graded Position-Sensitive Silicon Photomultipliers», *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, vol. 62, pp. 688-693, 2015. Doi: 10.1109/TNS.2015.2396671.
16. V. Schulz, Y. Berker, et al., «Sensitivity encoded silicon photomultiplier – a new sensor for high-resolution PET-MRI», *Phys. Med. Biol.*, vol. 58, pp. 4733-4748, 2013. Doi: 10.1088/0031-9155/58/14/4733.
17. C. Li, S. Wang, L. Huo et al., «Position Sensitive Silicon Photomultiplier With Intrinsic Continuous Cap Resistive Layer», *IEEE Trans. Electron Devices.*, vol. 61, pp. 3229-3232, 2014. Doi: 10.1109/TED.2014.2336171.
18. Y. Peng, T. Zhao, K. Liang, R. Yang, D. Han, «Characterization of Position Measurement Error, Position Resolution and Photoelectron Number Resolution for Position-Sensitive SiPMs», *Int. Conf. Advan. SiPM, Schwetzingen, Germany*, 2018. URL: <https://indico.gsi.de/event/6990/session/14/contribution/7/material/slides/0.pdf> (дата обращения: 9.01.2025).
19. H. Dautet, P. Deschamps, B. Dion et al., «Photon counting techniques with silicon avalanche photodiodes», *Appl. Opt.* vol. 32, pp. 38-94, 1993. Doi: 10.1364/ao.32.003894.
20. C. Dege, G. Prescher, T. Frach et al., «The digital Silicon Photomultiplier; A novel sensor for the detection of scintillation light» in: *IEEE Nucl. Sci. Symp. Conf. Rec.*, IEEE, 2009: pp. 2383-2386, 2009. Doi: 10.1109/NSSMIC.2009.5402190.
21. A.V. Akindinov, A.N. Martemianov, P.A. Polozov, V.M. Golovin, E.A. Grigoriev, «New results on MRS APDs», *Nucl. Instruments Methods Phys. Res. Sect. A Accel. Spectrometers, Detect. Assoc. Equip.* no. 387, pp. 231-234, 1997. Doi: 10.1016/S0168-9002(96)01201-6.

Solid-State Detectors of Optical Signals and Radiation.

Part 1.2. Review of the Detector Designs and Characteristics (Continuation)

Vinogradov Sergey (P.N. Lebedev Physical Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia; Scientific Production Company «Doza», Zelenograd, Russia)

Abstract. The first part of the review presents the history of the development of solid-state detectors and the features of their designs. The main attention is paid to avalanche photodiodes and silicon photomultipliers, the most sensitive and therefore the most demanded solid-state detectors of low-photon optical signals and radiation.

Keywords: photoelectric effect, photodiode, avalanche photodiode, APD, Geiger-mode APD, single-photon APD, silicon photomultiplier, SiPM.

С.Л. Виноградов (с.н.с., к.ф.-м.н.) – Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, г. Москва; НПП «Доза», г. Зеленоград

Контакты: тел. +7 (499) 132-62-86; vinogradovsl@lebedev.ru

УСТАНОВКИ КОНТРОЛЯ ЗАГРЯЗНЕННОСТИ



ДОЗА

Установки контроля загрязненности производства НПП «Доза» закрывают основные области применения, связанные с возможным загрязнением радиоактивными нуклидами: АЭС, пункты переработки и захоронения РАО, предприятия горно-обогатительного комплекса и ядерно-топливного цикла, заводы по производству радиофармпрепаратов, ядерные медицинские центры.

В основе разработок лежит уникальный сцинтилляционный блок детектирования, имеющий высокую чувствительность при компактных размерах. Это позволило создать оборудование для всех видов объектов оценки.



РЗБА-20Д

Установка конвейерного типа. Применяется для разбраковки спецодежды персонала



РЗБА-09Д

Установка портального типа. Предназначена для оценки загрязненности персонала: полный контроль тела и контроль мелких предметов



РЗБА-07Д, РЗБА/РЗА-08Д

Мобильные установки контроля. Предназначены для контроля загрязненности рук, ног обуви и одежды. РЗБА/РЗА-08Д выпускаются также в 7 консольном исполнении



УИМ-МД

Для оценки рук/ног и одежды также можно использовать стационарный комплекс УИМ-МД с соответствующими блоками детектирования



РЗБА-25Д

В зависимости от исполнения обеспечивает контроль загрязненности мелких и средних предметов: инструментов, измерительных приборов



МКС-17Д

Для контроля больших поверхностей, например, пола, применяется МКС-17Д с использованием дополнительной напольной штанги

Все установки имеют простой интуитивно понятный интерфейс и обеспечивают максимально эффективную оценку за минимальное время.



doza.ru



+7 (495) 777 84 85



info@doza.ru



Экстраполяционная ионизационная камера в твердотельном фантоме для воспроизведения поглощенной дозы низкоэнергетического рентгеновского излучения

Точное определение поглощенной дозы в биологической ткани или в воде, применяющейся в качестве ее эквивалента, является необходимым условием при лучевой терапии (дистанционной или брахиотерапии) с использованием низкоэнергетических гамма-источников или рентгеновского излучения. В статье описаны результаты исследований разработанной экстраполяционной ионизационной камеры с тонким входным окном, смонтированной в твердотельный фантом.

**А.В.Берлянд, В.А.Берлянд,
К.А.Кольцов**

Всероссийский научно-исследовательский институт физико-технических и радиотехнических измерений, пос. Менделеево Московской обл.

Рентгеновское излучение широко применяется в медицинской практике как при лучевой терапии, дистанционной и контактной (для целей брахиотерапии), так и в диагностике, например, при маммографии. В соответствии с рекомендациями Международной комиссии по радиационным единицам и измерениям [1] и отечественных документов [2], погрешность определения поглощенной дозы в биологической ткани при лучевой терапии не должна превышать 5%. Соответственно, средства измерений поглощенной дозы, используемые для этих целей, должны иметь погрешность 2–4%, а эталоны 1,5–3%. По диапазону энергий рентгеновское излучение условно делится на 3 группы. Средняя энергия характеризуется слоем половинного ослабления (СПО) 0,5–4 мм Cu, низкая энергия – СПО 1,0–8 мм Al, очень низкая энергия СПО 0,035–1,0 мм Al [3]. Государственный первичный эталон ГЭТ 38-2024 [4], созданный

Ключевые слова:

экстраполяционная ионизационная камера, поглощенная доза, рентгеновское излучение, фантом.

и хранящийся во ФГУП «ВНИИФТРИ», воспроизводит единицы мощности поглощенной дозы и поглощенной дозы фотонного излучения в диапазоне энергий от 15 кэВ до 50 МэВ. В рентгеновском диапазоне единицы этих величин воспроизводятся с помощью калориметра с поглотителем из фольги из чистого графита толщиной 0,12 мм и графитовой экстраполяционной камеры с входным окном из графитовой фольги [4,5]. Наиболее подходящим эквивалентом биологической ткани является вода. Соответственно, основной дозиметрической величиной при медицинском применении ионизирующего излучения являются поглощенная доза в водной среде. В случае низкоэнергетического рентгеновского излучения надо определять поглощенную дозу в воде на поверхности водного фантома, либо на поверхности фантома из твердого водозэквивалентного материала [6]. В качестве такого материала часто используется полиметилметакрилат (оргстекло). Известно, что калориметрический метод – это метод воспроизведения единиц поглощенной дозы фотонного излучения, наиболее близкий к определению этой величины. Но технически этот метод неприемлем для рентгеновского излучения очень

низких энергий вследствие сильного поглощения такого излучения деталями калориметра. Наилучшей альтернативой для этих целей является использование экстраполяционной ионизационной камеры (ЭИК). Использование цилиндрической ионизационной камеры или обычной плоскопараллельной камеры для определения поглощенной дозы в водном или твердотельном фантоме не позволяет получить приемлемую точность измерений, поскольку мощность поглощенной дозы низкоэнергетического излучения сильно меняется с глубиной расположения точки измерения в фантоме. ЭИК представляет собой плоскопараллельную ионизационную камеру, расстояние между электродами которой может меняться, и результат измерений ионизационного тока камеры может быть экстраполирован к нулевому зазору между электродами. ЭИК используются для дозиметрии бета-, гамма-, электронного и рентгеновского излучения [7-9].

Конструкция ЭИК

Для воспроизведения мощности поглощенной дозы рентгеновского излучения низких и очень низких энергий в оговоренных выше условиях в ФГУП «ВНИИФТРИ» была

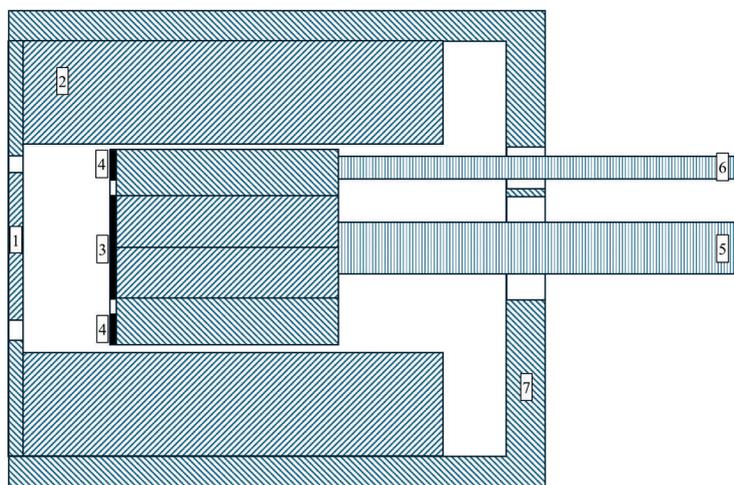


Рис.1. Схематический вид ЭИК. 1 – входное окно из алюминизированного майлара (потенциальный электрод), 2 – фантом, 3 – собирающий электрод, 4 – охранный электрод, 5 – микрометрическая головка, 6 – электронный индикатор часового типа, 7 – корпус.

разработана ЭИК, вмонтированная в твердотельный фантом. Конструкция ЭИК позволяет использовать фантомы из различных материалов. Используются фантомы из графита и таких материалов, как полиметилметакрилат и полиоксиметилен. Эти материалы близки к воде по ряду параметров – плотности, эффективному атомному номеру, количеству электронов на единицу массы. Эквивалентность материалов предполагает идентичность массовых коэффициентов поглощения, массовых тормозных способностей и массовых коэффициентов рассеяния. Схематически ЭИК в фантоме представлена на рис.1.

Мощность поглощенной дозы в воздухе в бесконечно тонком слое определяется по формуле:

$$D_{возд} = \frac{W}{e} \frac{I}{\rho S_{эф}} \frac{dI}{dx}, \quad (1)$$

где W/e – отношение энергии ионообразования в воздухе к заряду электрона, ρ – плотность воздуха, $S_{эф}$ – эффективная площадь собирающего электрода, I – ионизационный ток, x – расстояние между входным окном и собирающим электродом.

Измерение ионизационного тока осуществляется с помощью прецизионного дозиметра Unidos webline. Разность потенциалов между собирающим и потенциальным электродами менялась при изменении расстояния между электродами так, чтобы напряженность поля оставалась постоянной.

Определение измерительного объема

Измерительный объем ЭИК определяется расстоянием между электродами x и эффективной площадью собирающего электрода S . Расстояние x измеряется с помощью электронного микрометра типа МГЦ-25, имеющего разрешение 1 мкм. Для учета возможного «гистерезиса», возникающего при движении микрометрического винта в переднем и заднем направлении, используется дополнительный электронный микрометр часового типа ИЦ-25 с разрешением 1 мкм. Расстояние между электродами может меняться с помощью микрометрической головки в диапазоне от 0,5 до 25 мм. При этом необходимо определить, насколько показания микрометрической головки соответствуют действительному расстоянию

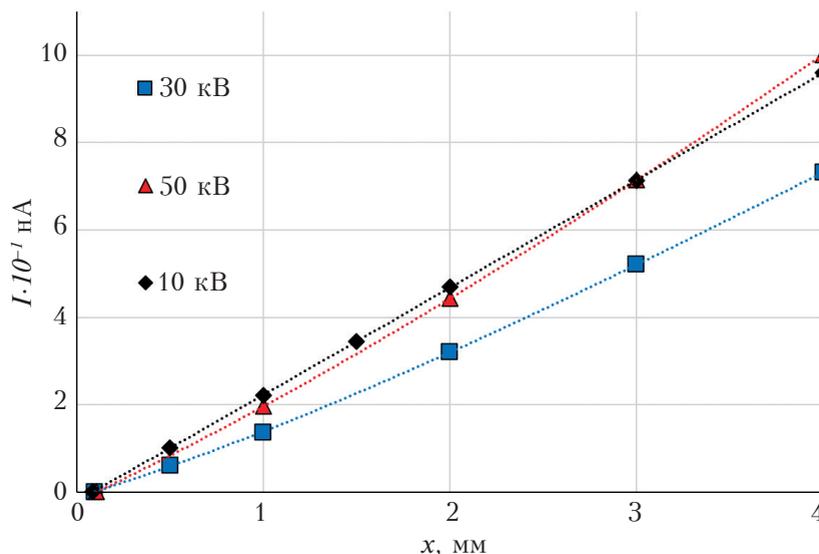


Рис.2. Зависимость ионизационного тока ЭИК от расстояния между электродами для рентгеновского излучения различного «качества».

между электродами, т. е. каково действительное нулевое расстояние между электродами. Для этого были проведены измерения ионизационного тока камеры для рентгеновского излучения разного качества при расстояниях между электродами x мм, (по показаниям микрометрической головки) от 0,5 до 4 мм. Результаты измерений приведены на рис.2.

В результате экстраполяции результатов измерений было установлено, что действительное значение нулевого зазора составляет $x_0 = 0,096$ мм. Таким образом, действительное значение расстояния между электродами $x_d = (x - 0,096)$ мм. Эффективная площадь собирающего электрода также не совпадает с площадью электрода, определенной исходя из его геометрических размеров. Поскольку ЭИК фактически представляет собой плоский конденсатор, то эффективная площадь собирающего электрода была определена по результатам измерений емкости камеры C при разных расстояниях между электродами [9] исходя из соотношения:

$$C = \varepsilon_0 \varepsilon_{\text{возд}} \frac{S_{\text{эф}}}{x_d}, \quad (2)$$

где ε_0 и $\varepsilon_{\text{возд}}$ – абсолютное и относительное значения диэлектрической проницаемости для

воздуха. Эффективные площади собирающих электродов для ЭИК с материалами фантомов из графита, полиметилметакрилата и полиоксиметилена были определены по результатам измерений емкости по соотношению (2).

Результаты экспериментальных исследований

На рис.3 приведена дифференциальная экстраполяционная кривая отношения ионизационного тока к расстоянию между электродами. Напряжение на трубке рентгеновского аппарата 10 кВ без дополнительных фильтров, средняя энергия 7,5 кэВ, слой половинного ослабления 0,037 мм Al.

В результате экстраполяции кривой к нулевому значению x_d определяется значение ионизационного тока у поверхности входного окна. И по соотношению (1) рассчитывается значение мощности поглощенной дозы в воздухе. Переход от поглощенной дозы в воздухе к поглощенной дозе в воде осуществляется в соответствии с теорией полости Брэгга-Грея, модифицированного Спенсером-Аттиком, при условии идентичности флюенсов электронов в воздухе и на поверхности входного окна ЭИК. Однако при взаимодействии рентгеновского излучения

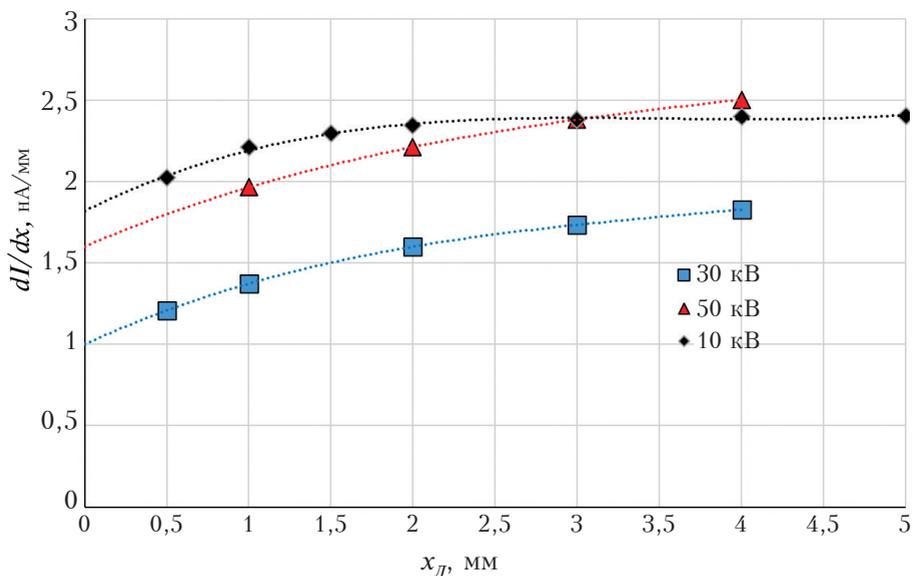


Рис.3. Зависимость отношения ионизационного тока ЭИК к зазору между электродами в зависимости от величины зазора для рентгеновского излучения различного «качества».

с очень низкими энергиями со средой возникающие вторичные электроны имеют очень низкую энергию и, соответственно, небольшие пробеги в воздухе. В этом случае нет равновесия вторичных заряженных частиц, и принцип Брэгга-Грея неприменим. Процедура перехода от поглощенной дозы в воздухе к поглощенной дозе в воде подробно изложена в работе [9]. Для реализации этой процедуры необходимо знание энергетического спектра рентгеновского излучения и усредненных по спектру излучения массовых коэффициентов поглощения для воды и воздуха. Энергетические спектры для конкретных условий измерений на рентгеновском аппарате Isovolt Titan E рассчитывались по программе SpekryWeb (Spekry ver.2.0.8). Для этих спектров рассчитывались усредненные значения массовых коэффициентов поглощения μ_{en}/ρ . Относительная стандартная неопределенность массовых коэффициентов поглощения для легкоатомных материалов оценивается в 2% для энергий менее 10 кэВ и в 1% для энергий в диапазоне

10–100 кэВ. Однако отношения усредненных значений μ_{en}/ρ для двух материалов вода–воздух оценивается в 0,5% для энергий в диапазоне 10–100 кэВ и 1% для энергий менее 10 кэВ [9].

Заключение

В результаты исследований было установлено, что разработанная экстраполяционная ионизационная камера, вмонтированная в твердотельный фантом, позволяет воспроизводить мощность поглощенной дозы в воде в энергетическом диапазоне эффективных энергий рентгеновского излучения от 5 до 100 кэВ. При эффективной энергии выше 25 кэВ используются дополнительные слои из тканеэквивалентного материала для достижения электронного равновесия. Относительная неопределенность результатов воспроизведения мощности поглощенной дозы в воде оценивается в 2,5% для эффективной энергии рентгеновского излучения менее 10 кэВ и в 1,5–2,0 % в диапазоне энергий 10–100 кэВ.

Литература

1. ICRU – Report 14 Radiation Dosimetry: X-Rays and Gamma Rays with Maximum Photon Energies Between 0,6–50 MeV.
2. РД 50-691-89. Поглощенные дозы фотонного (1–50 МэВ) и электронного (5–50 МэВ) излучений в лучевой терапии. Методы определения. М., 1990.
3. IPEMB Code of Practice for the determination of absorbed dose for X-rays below 300 kV generation potential (0,035 mm Al – 4 mm Cu HVL; 10–300 kV generation potential), *Phys. Med. Biol.* 41, 1996.
4. Берлянд А.В. Государственный первичный эталон единиц поглощенной дозы и мощности поглощенной дозы фотонного, электронного, протонного излучений и в пучках ионов углерода, количества, флюенса, плотности потока и энергии частиц в пучках протонов и тяжелых заряженных частиц ГЭТ 38-2024 // Измерительная техника. 2024. № 73(9). С. 12-18.
5. Берлянд А.В., Берлянд В.А. Воспроизведение мощности поглощенной дозы фотонного излучения в графите с помощью графитовой экстраполяционной камеры в графитовом фантоме // АНРИ. 2014. № 1(76). С. 56-59.
6. Absorbed dose determination in external beam radiotherapy. An international code of practice for dosimetry based on standards of absorbed dose to water. Technical reports series № 398. IAEA, Vienna, 2024.
7. U. Chica, M. Anguiano, A.M. Lallena, «Study of the formalism used to determine the absorbed dose for low-energy X-ray beams», *Phys. Med. Biol.*, no. 53. pp. 6963-6977, 2008.

8. H.-J. Selbach, H.-M. Kramer, W.S. Culberson. «Realization of reference air-kerma rate for low-energy photon sources», *Metrologia*, no. 45, pp. 422-428, 2008.
9. T. Schneider, B. Lange, H.-J. Selbach, «Towards a determination of the absorbed dose to water in water for low-energy photon-emitting brachytherapy seeds», *Metrologia*, no. 44, pp. 407-414, 2007.
10. Берлянд А.В., Берлянд В.А. Методическое обеспечение дозиметрии для целей лучевой терапии // Альманах современной метрологии. 2019. № 3(19). С. 54-57.

An Extrapolation Ionization Chamber in a Solid-State Phantom for Reproducing the Absorbed Dose of Low-Energy X-Ray Radiation

Berlyand Alexander, Berlyand Vladimir, Koltsov Kirill (Russian Metrological Institute of Technical Physics and Radio Engineering, Mendeleevo, Moscow region, Russia)

Annotation. Accurate determination of the absorbed dose in biological tissue or in water used as its equivalent is a prerequisite for radiation therapy (remote or brachotherapy) using low-energy gamma sources or X-rays. The article describes the research results of the developed extrapolation ionization chamber with a thin entrance window mounted in a solid-state phantom.

Keywords: *extrapolation ionization chamber, absorbed dose, X-ray radiation, phantom.*

А.В.Берлянд (н.с.), В.А.Берлянд (к.т.н., в.н.с.), К.А.Кольцов (инж.)

Всероссийский научно-исследовательский институт физико-технических и радиотехнических измерений, пос. Менделеево Московской обл.

Контакты: тел. (495) 660-17-44; sander.00007@gmail.com.

КОМПЛЕКС ДОЗИМЕТРИЧЕСКИЙ
ТЕРМОЛЮМИНЕСЦЕНТНЫЙ

ДОЗА-ТЛД



Комплекс «ДОЗА-ТЛД» в комплекте с разными типами индивидуальных термолюминесцентных дозиметров обеспечивает проведение индивидуального дозиметрического контроля (ИДК) при облучении фотонным и нейтронным излучением всего тела, а также определение индивидуальных доз бета- и фотонного излучения в коже лица, пальцев рук и хрусталике глаза.



+7 (495) 777 84 85



doza.ru

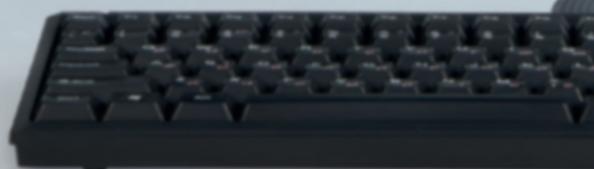


info@doza.ru



124460, г. Москва,
г. Зеленоград, Академика
Валиева, дом 4

doza.ru



Определение поглощенной дозы гамма-излучения в интенсивных радиоактивных полях с применением химической дозиметрии

Данная работа посвящена применению химической дозиметрии в условиях интенсивного радиоактивного облучения на различных ядерных и радиационно опасных объектах. Изучена зависимость изменения оптических свойств ряда органических растворителей под действием гамма-излучения, и определен эффективный состав дозиметрической жидкости для определения поглощенной дозы, обладающий стабильностью показаний во времени с минимальной погрешностью измерений и отсутствием пострадиационного эффекта.

Ключевые слова: химическая дозиметрия, дозиметрическая система, оптическая плотность (светопропускание) раствора, поглощенная доза гамма-излучения, экспоненциальная зависимость измерений, градуировочный график.

Е.Е.Куницына, В.И.Жованик

Научно исследовательский центр безопасности технических систем «12 Центральный научно-исследовательский институт» Минобороны России, г. Москва

Эксплуатация ядерных и радиационно опасных объектов различного назначения в той или иной степени связана с наличием полей гамма-излучения, интенсивность которых требует контроля как для обеспечения радиационной безопасности, так и в исследовательских целях.

Контроль интенсивного гамма-излучения, например, при испытательной деятельности на полигонах, на аварийных объектах, как правило, осуществляется дистанционно с помощью системы датчиков, размещаемых в зоне радиоактивного облучения, которые требуют прокладки кабельных линий при непрерывном контроле или их извлечения после облучения через определенное время. Прокладка кабельных линий к детекторам требует значительных временных и материальных затрат. В случае неопределенного места расположения источника радиоактивного облучения или его движения установка детекторов

с кабельными линиями бывает принципиально невозможной. В этом случае, как правило, устанавливаются дозиметры в местах наиболее вероятного размещения источника радиоактивного излучения. В случае сбоев электронной техники или опасности радиоактивного облучения испытателей целесообразно использовать изолированные дозиметрические системы (ДС), основанные на химической дозиметрии ионизирующих излучений.

Принцип их действия основан на способности ДС изменять свои свойства под действием излучения. К подобным свойствам относятся: вязкость, образование продуктов радиолитического распада, изменение светопропускания, флуоресценции и др. Любая из ДС имеет свои преимущества и недостатки, которые определяют пределы их применения. Остановимся на основных требованиях, предъявляемых к ДС в составе химического дозиметра и дадим краткую оценку наиболее распространенным ДС.

Особенности дозиметрических измерений химическими методами и анализ распространенных дозиметрических систем

Для определения поглощенной дозы с помощью ДС в общем случае необходимо знать величину выхода превращения, которое претерпевает система при облучении. Это значение обычно осуществляют сравнением поглощенной дозы, найденной прямым методом (чаще ионизационным или др.) с количеством химического превращения в этой системе при данной дозе.

Для градуировки вновь разрабатываемой ДС не обязательно непосредственно определять величину выхода превращения, достаточно построить градуировочную кривую, т. е. зависимость количества химического превращения в ДС от дозы при данных условиях [1].

В настоящее время в дозиметрии ионизирующих излучений предложено множество ДС, представляющих собой водные растворы, органические жидкости, твердые тела, газы

или смеси веществ. Однако широкое применение их в радиационной химии находят лишь немногие, удовлетворяющие определенным требованиям.

Во-первых, ДС должна иметь максимально возможный радиационно-химический выход продуктов радиолитического распада, который в широких пределах не должен зависеть, по возможности, от вида излучения, его энергии, дозы и мощности дозы, наличия примесей, температуры и других условий, которые могут меняться во время облучения.

Во-вторых, ДС должна быть стабильной до облучения и особенно после него в течение длительного времени (отсутствие пострадиационного эффекта).

В-третьих, желательна независимость от степени чистоты химических реактивов, составляющих рецептуру ДС для химического дозиметра.

Также следует отметить целесообразность выбора наиболее простых и оперативных аналитических методик для оценки химического превращения в ДС, т. е. выбор измеряемого превращения ДС (образование новых продуктов, изменение оптической плотности, вязкости...) и метода его оценки (потенциометрическое титрование, спектрофотометрирование, денситометрирование и др.).

Каждая из описанных в литературе ДС не удовлетворяет в полной мере всем перечисленным выше требованиям. В настоящее время наиболее изучены ДС на основе водных растворов, в частности, дозиметр Фрикке, который широко используется в исследовательских целях. В основе дозиметра лежит ферросульфатная ДС, представляющая собой $(1-5) \cdot 10^{-3}$ М водный раствор сернокислого закисного железа в 0,4 М H_2SO_4 , содержащий 10^{-3} моль/л $NaCl$ и насыщенный воздухом [1]. Под действием ионизирующего излучения на подобный раствор Fe^{2+} окисляется до Fe^{3+} , концентрация которого и служит мерой погло-

щенной дозы. Определение концентрации ионов Fe^{3+} , образующихся при радиоллизе ферросульфатной системы, проводят различными методами: потенциометрическим титрованием, колориметрическим и прямым спектрофотометрическим. При этом наиболее чувствительным является прямой спектрофотометрический метод определения оптической плотности в ультрафиолетовой области спектра с достаточной степенью точности (~2%), что позволяет использовать данную ДС в диапазоне 0,004–0,04 Мрад, верхний предел которого ограничивается израсходованием кислорода, присутствующего в растворе. Значимым недостатком при этом является необходимость приготовления ДС непосредственно перед облучением во избежание самопроизвольного медленного окисления системы, насыщенной воздухом, при нахождении вне облучения.

Из органических ДС широкое распространение получили растворы тетрахлорэтилена, хлорбензола и дихлорбензола в органических растворителях. При их облучении образуется HCl , количество которой и служит мерой дозы. Их состав достаточно сложный, но преимуществом является относительная нечувствительность к примесям. Запаянные ампулы, в которые разливается дозиметрический раствор, могут храниться несколько лет без изменения своих потребительских свойств. Концентрацию HCl после облучения определяют с помощью осциллографометра при измерении высокочастотной проводимости (ампулы при этом не вскрывают) либо с помощью титрования в присутствии индикатора [1].

Применение в качестве ДС дибутилфталата позволяет осуществить измерение доз облучения в интервале и малых, и больших доз, однако наличие пострадиационного эффекта требует долговременной выдержки ампул с ДС перед измерением [2]. Приготовление ДС на основе дибутилфталата в смеси с эпоксидиановой смолой и последующее

определение поглощенной дозы излучения из градуировочной зависимости изменения относительной вязкости раствора от дозы облучения показало отсутствие пострадиационного эффекта, однако заявлена точность измерения $\pm 10\%$ [3].

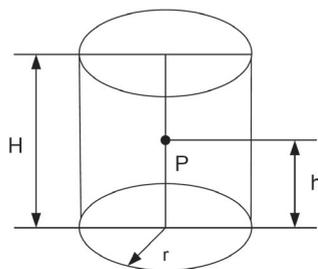
Таким образом, стабильность показаний ДС в целом после облучения зависит от сложных процессов радиолиза и полимеризации, сопровождающихся цепными реакциями при рекомбинации радикалов по различным механизмам, от чего напрямую зависит выход продуктов в зависимости от поглощенной дозы излучения.

Поскольку при выполнении работ на испытательных полигонах в полевых условиях не всегда возможны своевременная доставка в лабораторию имеющихся ДС и оперативное получение дозиметрической информации, специалистами НИЦ БТС 12 ЦНИИ Минобороны России были выполнены исследования по разработке такой ДС, которая должна отличаться стабильностью показаний в течение длительного времени, простотой с точки зрения состава рецептуры из химических реактивов обычной чистоты и широким диапазоном измерений одновременно с достаточным уровнем точности.

Исследование свойств дозиметрических систем на основе органических растворителей в смеси с элементарной серой

Разработка рецептуры жидкой ДС в представленной работе основана на относительном методе измерения светопропускания ДС при постоянном волновом числе в зависимости от времени облучения по сравнению с необлученной ДС. Дальнейшее определение поглощенной дозы гамма-излучения выполняют по градуировочной зависимости светопропускания от времени облучения (поглощенной дозы).

Для выполнения эксперимента применена облучательная установка «Исследователь»,



$$P = 2\pi\sigma K_{\gamma} \left(\operatorname{arctg} \frac{h}{r} + \operatorname{arctg} \frac{H-h}{r} \right)$$

σ – активность на единицу поверхности
 ($K_{\gamma} - \gamma$) – постоянная

Рис.1. Внешний вид облучательной установки «Исследователь» и алгоритм расчета дозы гамма-излучения в точке расположения бюксов с дозиметрической жидкостью.

которая состоит из свинцового контейнера, играющего роль биологической защиты, облучателя внутри контейнера, механизма подъема и поворота штока [1]. Внешний вид установки приведен на рис.1.

Цилиндрический облучатель представляет собой кассету с источниками гамма-излучения ^{60}Co . Кассета имеет 36 трубчатых ячеек, расположенных по окружности и скрепленных между собой.

Жидкую ДС помещают в стеклянные бюксы с притертыми крышками, которые затем помещают в зону облучения, время выдержки при этом составляет: 10 с (спуск–подъем), 30 с, 1 мин, 5 мин, 10 мин, 20 мин, 30 мин, 1 час. Максимальное время облучения определяется снижением светопропускания от 100% до минимальных значений (1–2%).

Во избежание выхода из строя индивидуального дозиметра для определения поглощенной дозы гамма-излучения в месте расположения бюксов с ДС применен расчетный метод в соответствии с алгоритмом расчета дозы для цилиндра с равномерно распределенной по боковой поверхности активностью, полость цилиндра – не поглощающее вещество [4]. По результатам расчетов, приведенным выше,

времени выдержки бюксов при облучении соответствует диапазон поглощенной энергии гамма-излучения 0–2 Мрад.

После облучения ДС переливается из бюксов в измерительные кварцевые кюветы спектрофотометра, работающего в области видимого и ультрафиолетового света (СФ-26). Кюветы с ДС для измерения зависимости светопропускания от поглощенной дозы гамма-излучения при постоянном волновом числе ($\lambda = 390$ нм) помещают в измерительный канал спектрофотометра и осуществляют измерения относительно необлученной ДС.

На предварительном этапе исследований анализировалось светопропускание ряда органических растворителей, насыщенных элементарной серой (S) для усиления процесса полимеризации под действием облучения и увеличения, таким образом, продуктов химического превращения в ДС. Перечень растворителей приведен в табл.1.

Выбор растворителей в смеси с элементарной S в качестве ДС был выполнен в соответствии со следующими условиями:

- радиочувствительность в диапазоне 380–400 нм;

Табл.1. Перечень органических растворителей в смеси с *S*, облученных в ходе исследований.

Наименование жидкости	Содержание элементарной серы, мг/100 мл жидкости						
	0,0	0,02	0,4	0,8	1,2	1,6	2,0 (нас.)
Скипидар							+
Бензол							+
Дихлорбензол	+	+	+	+	+	+	+
Хлорбензол							+
Ксилол							+
Четыреххлористый углерод					+		
Толуол							+
Дихлорэтан					+		+

- отсутствие значимой летучести ДС, снижающей светопропускание и искажающей таким образом результаты измерений;
- отсутствие пострадиационного эффекта и стабильность показаний светопропускания в течение длительного времени при отсутствии возможности проводить измерения непосредственно после облучения.

Дозиметрическая система на основе дихлорбензола с элементарной серой. Построение градуировочного графика

По анализу выполнения требуемых условий можно сделать следующие выводы:

- по радиочувствительности все растворители, насыщенные серой, находятся в диапазоне 280–400 нм при измерении светопропускания на спектрофотометре СФ-26;
- неароматические растворители, насыщенные серой, обладают повышенной летучестью;
- все растворители, насыщенные серой, исключая насыщенный серой дихлорбензол (ДХБ + $S_{нас.}$), обладают пострадиационным эффектом, т. е. в отсутствие облучения светопропу-

скание снижается и, таким образом, оценка показаний со временем становится некорректной.

На следующем этапе были проведены исследования по облучению ДХБ в смеси с элементарной *S* различной концентрации (табл.1), в результате чего выбрана и запатентована двухфазная система, состоящая из ДХБ и элементарной *S* в соотношении компонентов, соответствующих насыщению *S* в растворителе, масс. %:

- дихлорбензол – 98,0÷99,0;
- элементарная сера – 1,0÷2,0 [5].

Для построения градуировочной зависимости светопропускания ДХБ + $S_{нас.}$ от времени экспозиции (поглощенной дозы гамма-излучения) приводим результаты измерений светопропускания и его логарифма для данной ДС (табл.2).

По полученным результатам построена графическая зависимость светопропускания ДХБ + $S_{нас.}$ от времени экспозиции (поглощенной дозы гамма-излучения), которая приведена на рис.2.

Табл.2. Результаты измерений зависимости светопропускания ДХБ + $S_{нас.}$ и его логарифма от поглощенной дозы гамма-излучения.

Время экспозиции	Спуск–подъем	30 с	1 мин	5 мин	10 мин	20 мин	30 мин	1 ч
Доза поглощенная, <i>Мрад</i>	0,005	0,0017	0,03	0,17	0,33	0,7	1	2
Светопропускание <i>T</i> , %	96,7	93,7	88,0	73,3	63,0	42,0	28,5	8,5
lgT	1,98	1,97	1,94	1,88	1,8	1,62	1,45	0,93

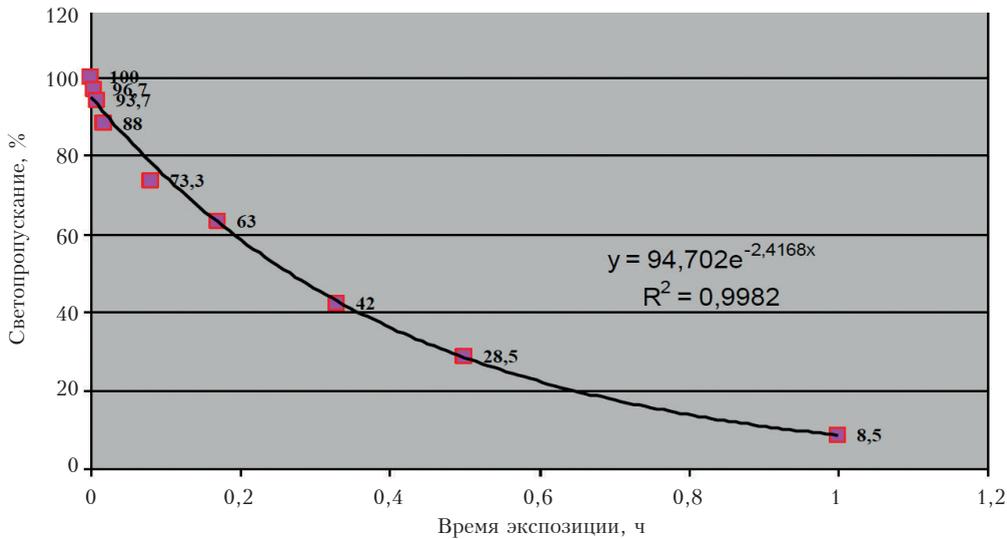


Рис. 2. График зависимости светопропускания ДХБ + $S_{нас.}$ от времени экспозиции (поглощенной дозы гамма-излучения).

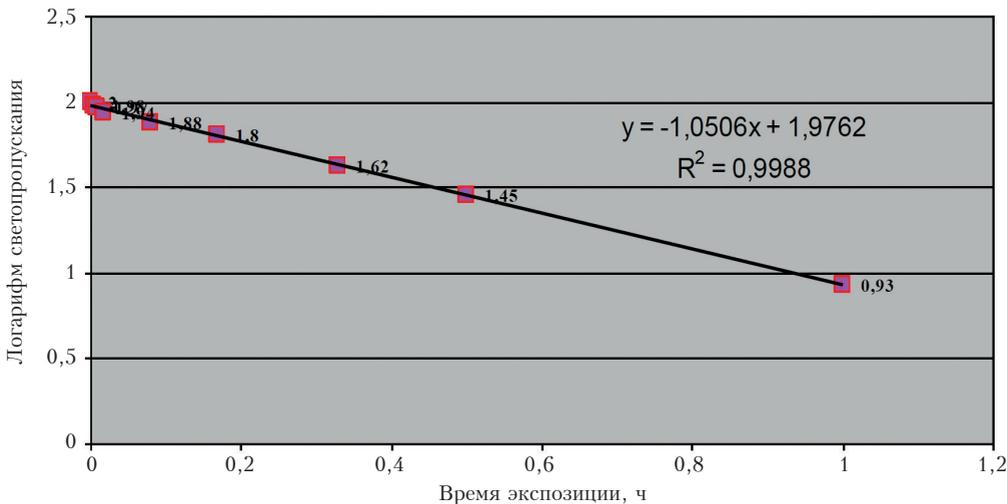


Рис. 3. Градуировочный график зависимости светопропускания ДХБ + $S_{нас.}$ от времени экспозиции (поглощенной дозы гамма-излучения) в полулогарифмическом масштабе.

Далее построен градуировочный график зависимости светопропускания ДХБ + $S_{нас.}$ от времени экспозиции (поглощенной дозы гамма-излучения) в полулогарифмическом масштабе, который приведен на рис.3.

Оценка погрешности измерений светопропускания ДС на основе ДХБ + $S_{нас.}$ под действием гамма-излучения

Исходные данные, а именно: экспериментальные значения светопропускания ($lgT_{экс.}$),

расчетные значения светопропускания ($lgT_{рас.}$) из градуировочного графика и отклонение между ними Δ для ДС на основе ДХБ + $S_{нас.}$ приведены в табл.3.

Расчетные значения $lgT_{рас.}$ определяются по формуле линейной зависимости из градуировочного графика (рис.3).

$$Y = -1,05 \cdot X + 1,98, \quad (1)$$

где: X – значения времени экспозиции, отн. ед.; Y – значения $lgT_{рас.}$ из градуировочного графика.

Табл.3. Исходные данные для определения погрешности измерений оптической плотности дозиметрической жидкости на основе ДХБ + $S_{нас}$.

№ п/п	Время экспозиции	Экспериментальное значение $lgT_{экс.}$	Расчетное значение $lgT_{рас.}$	Δ
1	0	2	1,98	0,02
2	0,004	1,98	1,98	0
3	0,008	1,97	1,97	0
4	0,017	1,94	1,96	0,02
5	0,08	1,88	1,90	0,02
6	0,17	1,8	1,78	0,02
7	0,33	1,62	1,63	0,01
8	0,5	1,45	1,45	0
9	1,0	0,93	0,93	0

Отклонение экспериментальных данных от значений по градуировочному графику определяется по формуле:

$$\Delta = |lgT_{экс.} - lgT_{рас.}| \quad (2)$$

Среднее отклонение составляет:

$$\bar{\Delta} = \frac{\sum_{i=1}^n \Delta_i}{n} = \frac{0,09}{9} = 0,01. \quad (3)$$

Среднеквадратическое отклонение для многократных измерений определяется по формуле:

$$\begin{aligned} \sigma &= \sqrt{\frac{\sum (\Delta_i - \bar{\Delta})^2}{n-1}} = \\ &= \sqrt{\frac{4 \cdot 0,0001 + 4 \cdot 0,0001 + 0}{8}} = \\ &= \sqrt{0,0001} = 0,01 \end{aligned} \quad (4)$$

Двойное среднеквадратическое отклонение составляет:

$$2\sigma = 0,02; \quad lgT = 0,02; \quad 10^{0,02} = 1,047.$$

Таким образом, случайная составляющая погрешности измерений (двойное среднеквадратическое отклонение) не превышает 5%, что свидетельствует о высокой точности и, соответственно, достоверности измерений для определения поглощенной дозы гамма-излучения.

Выводы

Облучение ДС на основе ДХБ + $S_{нас}$ не имеет пострадиационного эффекта во всем диапазоне измеряемой поглощенной дозы гамма-излучения, что подтверждено наблюдениями за стабильностью показаний в течение более 1 месяца. Данное обстоятельство не требует оперативности в выполнении измерений, что важно для полигонной испытательной деятельности.

Случайная составляющая погрешности измерений, рассчитанная по линейной зависимости, приведенной на градуировочном графике зависимости светопропускания ДС на основе ДХБ + $S_{нас}$, не превышает 5% при доверительной вероятности 0,95, что свидетельствует о высокой точности и, соответственно, достоверности измерений для определения поглощенной дозы гамма-излучения.

Изменяя условия измерений, а именно, волновое число в диапазоне $\lambda = 390 \div 10$ нм, возможно снижать чувствительность светопропускания и соответственно увеличивать заявленный диапазон определения поглощенной дозы гамма-излучения.

ДС на основе ДХБ + $S_{нас}$ включает химические реактивы обычной степени чистоты, прямые измерения светопропускания выполняются по простой и оперативной методике, не требующей высокой квалификации специалистов.

Литература

1. Пикаев А.К. Современная радиационная химия. Основные положения. Экспериментальная техника и методы. М.: Наука, 1985. 385 с.
2. Лобанов Н.С., Лобанов Г.П. Авторское свидетельство СССР № 1500118, кл. G01T1/04. Способ определения интегральной дозы гамма-облучения: опубл. 22.12.1987.
3. Ушаков Г.П., Лобанов Н.С. Авторское свидетельство СССР № 1575726, кл. G01T1/02. Способ дозиметрии ионизирующих излучений. Опубл. 06.10.1988.
4. Козлов В.Ф. Справочник по радиационной безопасности. М.: Атомиздат, 1977. 186 с.
5. Куницына Е.Е., Колчин В.В. Патент № 2693552 Российская Федерация, МПК G01T 1/00 (2006.01). Способ определения поглощенной дозы гамма-излучения. Опубл. 04.07.2019.

Detection of Absorbed Gamma-Radiation Doze in Intensive Radioactive Fields with the Use of Chemical Dosimetry

Kunitsyna Elena, Zhovanik Vitalii («12th Central Research Institute» of the Ministry of Defense of Russia, Moscow, Russia)

Abstract. This Work is devoted to the use of chemical dosimetry in conditions of intensive radiation exposure at various nuclear and radiation-hazardous facilities.

The dependence of change in the optical properties of a number of organic solvents under gamma radiation has been studied and the most effective composition of the dosimetric liquid for the absorbed dose detection having stable readings over time with the minimal measurement error and absence of radiation effect has been determined.

Keywords: *chemical dosimetry, dosimetry system, solution optical density (optical transmission), absorbed gamma radiation dose, measurement exponential relation, calibration curve.*

Е.Е.Куницына (к.т.н., с.н.с.), В.И.Жованик (инж.)

Научно-исследовательский центр безопасности технических систем «12 Центральный научно-исследовательский институт» Минобороны России, г. Москва

Контакты: elena_kunitsyna60@mail.ru; +7 (921) 330-98-13

Применение природных материалов с низким содержанием радионуклидов в качестве защиты от внешнего фона при проведении лабораторных гамма-спектрометрических и радиометрических измерений

Рассмотрен оригинальный способ организации защиты от внешнего фона при проведении гамма-спектрометрических и радиометрических измерений, при котором внутренняя поверхность стен, пола и потолка лабораторного помещения закрывается сплошным экраном из природных материалов с низким содержанием радионуклидов. Применение данного способа позволяет исключить затраты на приобретение традиционных металлических защитных камер, используемых для низкофоновой гамма-спектрометрии и радиометрии, снять ограничения на размер измеряемой пробы, устанавливаемые внутренними размерами измерительной полости защитной камеры. Установлено, что оптимальными материалами для указанных целей являются природные карбонаты с содержанием CaCO_3 не ниже 98%. Определены границы применения данного способа организации защиты, проведено экспериментальное подтверждение эффективности предложенного способа путем измерений в меловой келье Дивногорского пещерного храма. Разработан эскиз компоновки лабораторного помещения, реализующего предложенный способ защиты от внешнего фона при проведении измерений.

**В.П.Поваров, В.С.Росновский,
Е.И.Юрченко, В.Н.Карасев,
С.В.Росновский,
В.В.Добрынин, Ф.Г.Соколов,
А.А.Смородинов**

Филиал АО «Концерн Росэнергоатом»
«Нововоронежская АЭС», г. Нововоронеж
Воронежской обл.

Ключевые слова:

гамма-спектрометрия, радиометрия, экранирование, карбонат кальция, лаборатория, радиационный контроль.

Одним из основных методов, применяемых в настоящее время для анализа содержания радионуклидов в объектах окружающей среды, является низкофоновая гамма-спектрометрия с полупроводниковыми детекторами. При использовании современной приборной базы указанный метод обеспечивает необходимые на практике значения чувствительности и точности, а также удовлетворяет требованию высокой эффективности измерительных процедур.

При проведении гамма-спектрометрических и радиометрических измерений образцов с малой удельной активностью большое влияние на качество измерений оказывают факторы внешнего фона в месте проведения измерений.

В связи с наличием в лаборатории собственного гамма-фона для набора необходимой статистики и уверенного выделения полезного сигнала над фоном приходится увеличивать время измерений до нескольких часов и даже дней. Гамма-фон в помещении определяет нижний предел измерения (НПИ) для данного детектора, ниже которого активность не может быть измерена с приемлемой достоверностью.

Основными факторами, вносящими вклад в фон в лаборатории, являются:

1. Космическое гамма-излучение;
2. Излучение от внешних техногенных источников излучения;
3. Гамма-излучение, создаваемое радионуклидами природного происхождения, содержащимися в строительных конструкциях лабораторного помещения.

Радионуклидами, определяющими гамма-фон на открытой местности (не загрязненной техногенными радионуклидами), являются ^{40}K , ^{238}U , ^{232}Th . Горные породы вулканического происхождения (особенно граниты) по сравнению с осадочными (за исключением сланцев) обладают большей активностью. Помимо этого, в почвах могут содержаться радиоизотопы, индуцированные космическим излучением, например, C^{14} .

Для ослабления влияния природных радионуклидов, содержащихся в строительных конструкциях, на качество измерений традиционным является использование специальных толстостенных металлических конструкций (экранов-защит). При этом во время измерения блок детектирования гамма-спектрометра и измеряемая проба находятся внутри экрана-защиты, ослабляющего внешнее гамма-излучение.

Известна конструкция модуля биологической защиты по патенту RU 66841 [МПК G21F7/00, опубл. 27.09.2007], выполненного двустенным, обшитым стальными листами, содержащим в промежутках, образованных между внутренними и внешними стенками, свинцовую дробь, выполняющую роль экранирующего ионизирующее излучение поглотителя.

В настоящее время в природной среде достаточно широко распространены радионуклиды искусственного происхождения, появившиеся, главным образом, вследствие ранее проводившихся испытаний ядерного оружия в атмосфере, а также в результате техногенных аварий на объектах атомной энергетики. Радионуклиды искусственного происхождения содержатся, в том числе, в составе свинца и других конструкционных материалов экранов-защит. В связи с этим, для изготовления низкофоновых экранов-защиты приходится изготавливать его внутренний слой из особо отобранного свинца – как правило, свинцовых изделий, изготовленных до 1950 г. Свинец перед изготовлением внутренних элементов защиты подвергается тщательному радиационному контролю, при необходимости проводится многоступенчатая дезактивация. Таким образом, изготовление низкофоновых экранов-защиты представляет собой технически сложный и затратный процесс.

Известна низкофоновая гамма-спектрометрическая лаборатория ЛРК-1 МИФИ [1], которая расположена в полуподвальном проветриваемом помещении и включает в себя семь индивидуальных спектрометрических трактов (ИСТ). Спектрометр предназначен для определения радионуклидного состава и активности радионуклидов в пробах окружающей среды методами низкофоновой гамма-спектрометрии с полупроводниковыми детекторами в стационарных лабораторных условиях. Низкофоновая защита, входящая в состав каждого ИСТ, выполнена по модульному принципу и состоит из:

- внешней защитной оболочки (обычный свинец, толщина стенки 100 мм);
- внутренних модулей (низкофоновый свинец, толщина стенки от 20 до 40 мм);
- облицовки внутренней оболочки (медь, толщина от 5 до 15 мм);
- крышки (аналогична внешней защитной оболочке).

Применение внутренних модулей различных конфигураций позволяет помещать в камеру измерительные контейнеры различной геометрии, а также использовать детекторы разных конструкций. Подъемный механизм обеспечивает доступ внутрь защиты при смене проб, замене внутренних модулей и при извлечении детектора.

Для уменьшения вклада в фон установки гамма-излучения дочерних продуктов радионуклида ^{226}Ra внутренний объем защитной камеры постоянно продувается парами жидкого азота.

Исследуемые пробы помещаются в цилиндрические контейнеры объемом 145 см³ (Ø 95×30 мм) или 250 см³ (Ø 95×50 мм), либо в контейнер с геометрией Маринелли объемом 500 см³ или 1000 см³.

Аналогичные защитные камеры входят в состав двух гамма-спектрометрических трактов низкофоновой гамма-спектрометрической лаборатории филиала АО «Концерн Росэнергоатом» «Нововоронежская АЭС».

Вес защитной камеры в сборе с блоком детектирования не превышает 600 кг; габаритные размеры, включая пространство для открывания /сдвига крышки: 0,6×0,8×1,3 м (W×D×H).

Указанный способ ослабления внешнего гамма-фона имеет ряд недостатков, в том числе: размер пробы ограничен размерами внутренней полости экрана-защиты; для обеспечения необходимого качества измерений внутренние модули низкофоновой защиты необходимо изготавливать из специального низкофонового свинца.

В целях нивелирования влияния космического гамма-излучения и излучения от внешних техногенных источников низкофоновую лабораторию иногда размещают в подземных помещениях, располагаемых много ниже уровня земли.

Так, национальная лаборатория Гран-Сассо [2] итальянского Национального института ядерной физики, занимающаяся экспериментами в области физики элементарных частиц и ядерной физики, состоит из наземной части и подземных помещений, расположенных на средней глубине около 1400 м и на высоте около 1000 м над уровнем моря. Подземное расположение позволяет на много порядков уменьшить фон от космических лучей в экспериментах, требующих крайне высокой чувствительности к ядерным событиям, что необходимо для регистрации редких радиоактивных распадов, исследования солнечных, реакторных и ускорительных нейтрино, детектирования взаимодействий гипотетических частиц темной материи с веществом.

Еще один пример подземного размещения – Солотвинская низкофоновая лаборатория, принадлежащая Институту ядерных исследований НАН Украины [3], расположенная в шахте № 9 солерудника.

Недостатком организации лабораторий в подземных шахтах является зависимость места их размещения от ранее проведенных горнорудных работ, что не всегда позволяет разместить лабораторию там, где она необходима исходя из текущих производственных задач.

Оригинальной идеей, позволяющей решить с приемлемым качеством все вышеперечисленные проблемы, может являться организация низкофоновой радиационной лаборатории в подвальном помещении с использованием в качестве биозащиты облицовку стен, потолка и пола природными материалами с низким содержанием природных радионуклидов.

Существующие строительные материалы мало подходят для создания защитного экрана, поскольку содержание в них природных радионуклидов не позволяет организовать измерения без дополнительной защиты. Известно использование строительных смесей, предназначенных для изготовления радиационно-защитных камней, стен, перегородок и штукатурных растворов различного состава, в том числе, на основе бетонных смесей. Так, в патенте RU 2172989 [МПК G21F1/04, опубл. 27.08.2001] предложено использование смеси следующего состава: цемент, железорудный концентрат, пластифицирующая добавка и вода, причем линейный коэффициент ослабления при $E = 0,66$ МэВ находится в интервале от 0,19 до 0,23 см⁻¹. Существует также сухая строительная смесь [RU2233255, МПК C04B28/30, опубл. 27.07.2004] для экранирования помещений от электромагнитных излучений и геопатогенного воздействия поля Земли, в состав которой входят: порошок магнезитовый каустический, модифицирующая добавка, которая содержит природный минерал шунгит, или дополнительно содержит баритовый концентрат [RU 2388715, МПК C04B28/30, G21F1/04, C04B111/20, опубл. 10.05.2010].

Недостатком применения указанных смесей является наличие в них природных радионуклидов как осадочного, так и вулканического происхождения, создающих собственный гамма-фон.

При сооружении строительных конструкций низкофоновой лаборатории целесообразно использовать материалы с низким содержанием радионуклидов для создания защитного экрана из мела или мрамора по всей поверхности строительных конструкций помещения (пола, стен и потолка), либо для сооружения строительных конструкций непосредственно из меловых или мраморных блоков.

Наиболее подходящим материалом для изготовления внутренних строительных конструкций низкофоновой гамма-спектрометрической лаборатории является мел, имеющий чистоту по CaCO₃ свыше 98% [4]. Поскольку мел является осадочной породой и представляет собой продукт метаболизма древних организмов (червей мелового периода), он фактически не содержит примесей K, U и Th. Радиоизотопы O, C и Ca, индуцированные космическим излучением, имеют малый, по отношению к возрасту меловых пород, период полураспада, и в меле также отсутствуют. В случае, если мел добыт не из поверхностных слоев, в нем отсутствуют и техногенные радионуклиды, обусловленные ядерными испытаниями и чернобыльскими выпадениями. Таким образом, мел (равно как и мрамор) практически лишен основных источников естественного радиационного фона, присутствующих в бетонных и металлических изделиях современных строительных конструкций, и является оптимальным материалом для сооружения низкофоновой гамма-спектрометрической лаборатории.

Как известно, радиационный фон имеет две основных составляющих (если исключить радон и его ДПР):

- природные р/н – в рассматриваемой местности это 0,08 мкЗв/ч;
- космический фон (в основном это протоны) – в средних широтах это 0,03–0,04 мкЗв/ч.

Если предположить, что степень химической чистоты мела определяет степень его свободы от естественных радионуклидов, а техногенных нуклидов мел не содержит по определению, то можно ожидать в меловых отложениях снижения радиационного фона, обусловленного наличием природных р/н относительно наружного до величин: $0,08 \text{ мкЗв/час} \cdot (1-0,98) = 0,0016 \text{ мкЗв/час}$.

Учитывая, что мел обладает плотностью выше плотности обычного строительного бетона ($2,7 \text{ г/см}^3$ против $2,3 \text{ г/см}^3$), толщина внутреннего защитного слоя лаборатории, эффективно снижающего излучение ^{40}K в 100 раз, составляет не более 500 мм. Указанная величина может быть принята в качестве минимально-допустимой толщины слоя защиты из меловых блоков.

Защита из 50 см мела практически полностью поглотит мягкую составляющую космического излучения, которая состоит из электронов и позитронов и дает вклад в общую дозу от космического излучения около 30%, но не повлияет на интенсивность жесткой компоненты, состоящей из высокоэнергетических мюонов. Таким образом, можно ожидать снижения фона космического излучения в защите из 50 см мела с $0,035 \text{ мкЗв/ч}$ до $0,0245 \text{ мкЗв/ч}$.

Таким образом, общее значение гамма-фона снижается до величины порядка $0,03 \text{ мкЗв/ч}$ во всем объеме лабораторного помещения, имеющего меловую облицовку, а не только в рабочем объеме защитной камеры, что позволяет проводить гамма-спектрометрические и радиометрические измерения объектов произвольного объема и геометрии.

В табл.1 показаны значения концентраций некоторых радионуклидов в горных породах и соответствующая ей мощность поглощенной дозы на высоте 1 м от поверхности Земли [5].

Имеющиеся научные данные свидетельствуют о том, что меловые породы (известняки, карбонаты) являются оптимальным материалом для формирования защитного экрана, обеспечивающего минимизацию природного фонового излучения при проведении гамма-спектрометрических и радиометрических измерений.

Для проверки данного заключения специалистами НВАЭС выполнены радиационные измерения в помещениях исторического объекта, расположенного на территории Воронежской области – подземной пещерной церкви Сицилийской иконы Божьей матери (Лискинский район, с. Дивногорье) – см. фото на 1-й стр. обложки. Церковь расположена в меловой толще, что позволяет считать условия измерений приближенными к тем, что могут быть искусственно созданы в измерительной лаборатории при применении меловых блоков в качестве облицовки пола, стен и потолка.

Табл.1. Концентрация некоторых радионуклидов в горных породах и соответствующая ей мощность поглощенной дозы на высоте 1 м от поверхности Земли [5].

Тип породы	Концентрация радионуклидов, нКи/кг (Бк/кг)			Мощность поглощенной дозы, мкрад/ч (10^{-8} Гр/ч)
	калий-40	уран-238	торий-232	
Вулканические:				
кислые (граниты)	27,0 (1000)	1,60 (60)	2,20 (81)	12,0 (12,0)
промежуточные (диориты)	19,0 (700)	0,62 (23)	0,88 (32)	6,2 (6,2)
ультраосновные (диабазы)	4,0 (150)	0,01 (0,37)	0,66 (24)	2,3 (2,3)
Осадочные:				
известняки	2,4 (89)	0,75 (28)	0,19 (7,0)	2,0 (2,0)
карбонаты	-	0,72 (27)	0,21 (7,8)	1,7 (1,7)
песчаники	10 (370)	0,5 (18,5)	0,30 (11)	3,2 (3,2)
сланцы	19 (700)	1,20 (44)	1,20 (44)	7,9 (7,9)

Табл.2. Результаты измерений.

Расположение точки измерений	Измеренное значение фона, с ⁻¹ (мкР/ч)	Наличие линий техногенных радионуклидов в спектре
На территории, прилегающей к церкви. Поверхность грунта у подножия меловой горы	16±19 (5±6)	Присутствует Cs-137, обусловленный глобальными выпадениями (рис.1)
Дальний от входа правый угол основного моельного зала церкви. На поверхности пола	2±4 (0,8±1,2)	Линии техногенных радионуклидов в спектре отсутствуют (рис.2)

Результаты измерений приведены в табл.2 и в целом подтверждают выводы о возможности организации радиационной лаборатории в помещении, облицованном меловыми блоками.

Для проведения измерений использовался радиометр типа СРП-68 с диапазоном измерений регистрируемого потока гамма-излучения от 0 до 100 с⁻¹ (мощности экспозиционной дозы от 0±30 мкР/ч) и спектрометром энергии гамма-излучения типа «Гамма-1С/НВ1-01,02» с датчиком на базе кристалла NaI(Tl) 40×40 мм.

Помимо этого, с помощью переносных гамма-спектрометров «Гамма-1С/НВ1-01,02» был проведен анализ фонового спектра с целью определения наличия техногенных радионуклидов.

Как можно видеть, результаты измерений находятся в хорошем соответствии с принятыми предположениями (рис.2).

Значения гамма-фона по скорости счета за пределами церкви составили 16–19 с⁻¹ (0,05–0,06 мкЗв/ч), что примерно в два раза ниже гамма-фона, характерного для Воронежской области (20–22 с⁻¹ (0,12–0,14 мкЗв/ч)). Анализ фонового спектра показал наличие техногенного радионуклида Cs-137, обусловленного следами глобальных выпадений.

Внутри церкви измеренные значения гамма-фона по скорости счета составили порядка 18 с⁻¹ (0,01 мкЗв/час). Линии техногенных радионуклидов в спектре не обнаружены.

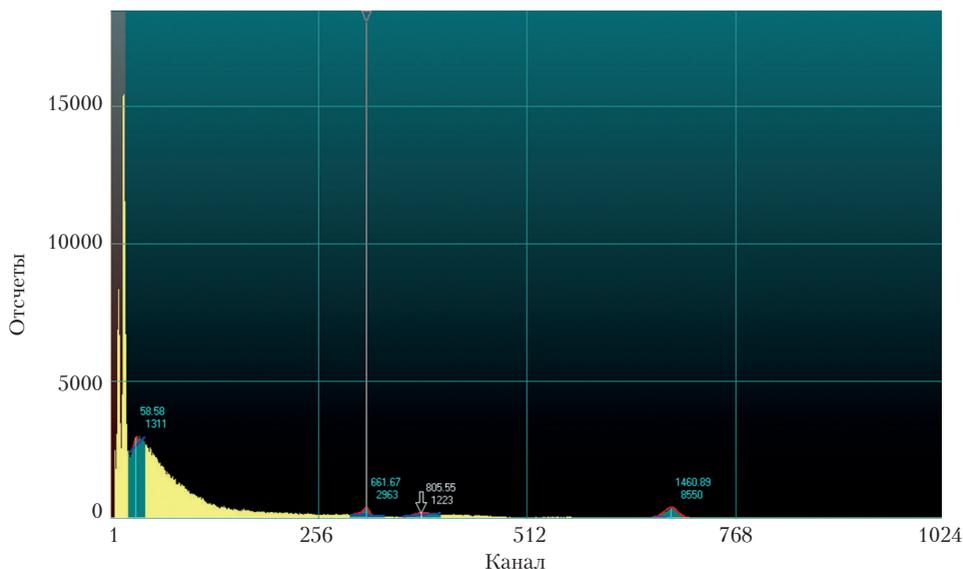


Рис.1. Спектр гамма-излучения за пределами церкви. В спектре присутствует линия 661 КэВ, что соответствует техногенному радионуклиду Cs-137.

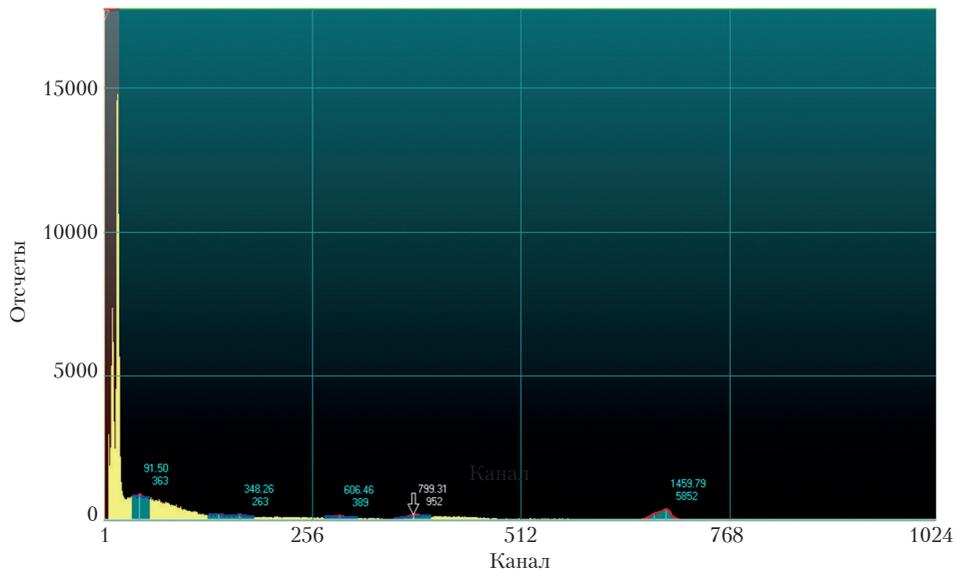


Рис.2. Спектр гамма-излучения внутри церкви. В спектре линии техногенных радионуклидов не обнаружены.

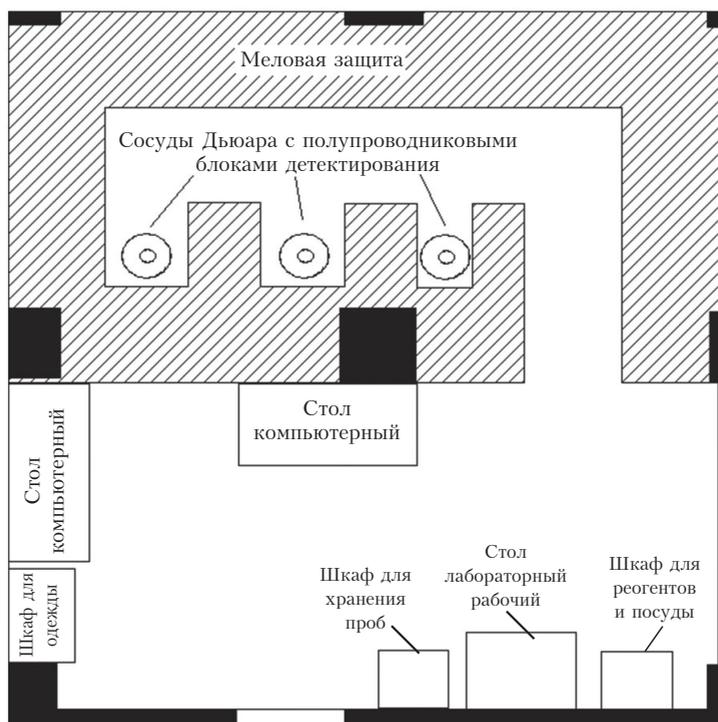


Рис.3. Эскиз компоновки оборудования в низкофоновой меловой лаборатории.

Таким образом, экспериментально была подтверждена возможность реализации низкофоновой гамма-спектрометрической лаборатории в помещении, внутренние поверхности которого выполнены из мела или мрамора, с отказом от применения металлических защитных камер.

Технически данная идея может быть реализована путем размещения низкофоновой гамма-спектрометрической лаборатории в полуподвальном или подземном помещении, стены, пол и потолок помещения облицованы блоками горной породы, состоящей не менее чем на 98%

из карбоната кальция, причем толщина блоков находится в диапазоне от 500 до 1000 мм. Низкофоновая гамма-спектрометрическая лаборатория может быть также расположена в имеющейся меловой штольне или выработке, образовавшейся ранее при горнорудных работах.

Для практической реализации идеи наиболее приемлемым с точки зрения технологии строительства является применение блоков из мрамора. ГОСТы [6,7] допускают применение при строительстве мраморных изделий толщиной до 400 мм. Таким образом, для практической реализации идеи могут быть использованы стандартные промышленные изделия из мрамора толщиной по 250 мм в два слоя для получения общей толщины защитного слоя 500 мм. Однако стоимость низкофоновой лаборатории при использовании мраморных блоков будет достаточно велика.

С экономической точки зрения более привлекательным является применение меловых блоков, стоимость которых значительно меньше стоимости мрамора. Варианты применения меловой защиты:

- организация лаборатории в выработанной меловой штольне;
- организация лаборатории в помещении общепромышленного назначения. Меловые блоки в этом случае должны использоваться в качестве внутреннего облицовочного слоя помещения лаборатории, не несущего нагрузки от перекрытий.

Разработана концепция организации низкофоновой меловой лаборатории, которая может быть организована в подвальном помещении (пом. № 027) инженерно-лабораторного корпуса (ИЛК) Филиала АО «Концерн Росэнергоатом» «Нововоронежская АЭС», которая реализует данный способ защиты от внешнего гамма-фона.

На рис.3 представлен эскиз компоновки оборудования в низкофоновой меловой лаборатории размером 6000×6000 мм, которая может быть организована в подвальном помещении (пом. № 027) инженерно-лабораторного корпуса (ИЛК) Филиала АО «Концерн Росэнергоатом» «Нововоронежская АЭС».

Пол помещения расположен на глубине 7,2 метра, что обеспечивает изоляцию измерительного объема от космического гамма-излучения и воздействия внешних техногенных источников. Помещение имеет размер 6000×6000 мм. В половине помещения организуется измерительный объем, включающий три изолированные меловые камеры. Стены, потолок и пол измерительного объема обкладываются меловыми или мраморными блоками. Общая толщина защитного слоя мела/мрамора составляет порядка 800 мм. В каждой меловой камере размещается блок детектирования полупроводникового гамма-спектрометра и сосуд Дьюара с жидким азотом для охлаждения блока детектирования. Во второй половине помещения организуются рабочие места персонала, включающие два компьютерных стола для размещения гамма-спектрометрического оборудования; лабораторный рабочий стол для обращения с пробами; шкаф для хранения проб; шкаф для реагентов и посуды; шкаф для одежды, используемый для переодевания персонала.

Таким образом, предложенный способ организации низкофоновых радиационных лабораторий в подземных помещениях с применением в качестве защитного экрана облицовки из материалов с низким содержанием природных радионуклидов представляется вполне реализуемым и целесообразным как с точки зрения экономической выгоды, так и с точки зрения удобства сотрудников лаборатории при выполнении радиационных измерений.

Литература

1. URL: <http://www.radiation.ru/research/laborat.htm> (дата обращения: 27.01.2025).
2. URL: http://ru.wikipedia.org/wiki/Национальная_лаборатория_Гран-Сассо (дата обращения: 27.01.2025).
3. URL: <http://ru.wikipedia.org/wiki/Солотвино> (дата обращения: 27.01.2025).
4. Кудеярова Н.П., Назарова В.В., Рожков В.П. Меловые толщи Белгородской области: состав, структура и свойства // Строительные материалы. 2010.
5. А.М. Кузин. Невидимые лучи вокруг нас. М.: Наука, 1980, 151 с.
6. ГОСТ 9479-98. Блоки из горных пород для производства облицовочных, архитектурно-строительных, мемориальных и других изделий. Технические условия.
7. ГОСТ 23342-91. Изделия архитектурно-строительные из природного камня. Технические условия.

The Use of Natural Materials with a Low Content of Radionuclides as Protection from the External Background During Laboratory Gamma-Ray Spectrometric and Radiometric Measurements

Povarov Vladimir, Rosnovskiy Viktor, Karasev Vyacheslav, Rosnovsky Sergey, Smorodinov Andrei, Sokolov Fedor, Dobrynin Virtor, Yurchenko Evgeny (Rosenergoatom, Joint-Stock Company (REA JSC) Novovoronezh Nuclear Power Plant (Novovoronezh NPP), Novovoronezh, Voronezh region, Russia)

Abstract. An original method of organizing protection from the external background during gamma-spectrometric and radiometric measurements is considered, in which the inner surface of the walls, floor and ceiling of the laboratory room is covered with a solid screen made of natural materials with a low content of radionuclides. The use of this method makes it possible to eliminate the cost of purchasing traditional metal protective chambers used for low-background gamma-ray spectrometry and radiometry, and to remove restrictions on the size of the measured sample set by the internal dimensions of the measuring cavity of the protective chamber. It has been established that natural carbonates with a CaCO_3 content of at least 98% are the optimal materials for these purposes. The boundaries of the application of this method of protection organization have been determined, and experimental confirmation of the effectiveness of the proposed method has been carried out by measurements in the Cretaceous cell of the Divnogorsky cave temple. A sketch of the layout of the laboratory room has been developed, which implements the proposed method of protection from the external background during measurements.

Keywords: *gamma-ray spectrometry, radiometry, shielding, calcium carbonate, laboratory, radiation control.*

В.П.Поваров (д.т.н., зам.ген.директора), В.С.Росновский (оператор реакторного отд.), В.Н.Карасев (зам.нач.цеха по обрац. с РАО), С.В.Росновский (зам.гл.инж.), В.В.Добрынин (зам.нач.отд. РБ), Ф.Г.Соколов (зам.нач.цеха по РБ), А.А.Смородинов (вед.инж.), Е.И.Юрченко (инж.-физик) – Филиал АО «Концерн Росэнергоатом» «Нововоронежская АЭС», г. Нововоронеж Воронежской обл.

Контакты: тел. +7 (920) 889-00-30; rosnovskyviktor@yandex.ru

Кризис регулирования радона в России: проблема тестирования зданий и альтернативный метод

Часть 2

Первая часть настоящей статьи [3] была посвящена дискуссии с ответственным регулятором о кризисе в регулировании радонного риска по четырем актуальным вопросам. Во второй части статьи более подробно обсуждается состояние и способ решения проблемы измерений радона и оценки соответствия тестируемых помещений зданий требованиям норм радиационной безопасности. Изложение разделено на шесть частей: (i) вопрос отмены нормирования торона в зданиях, (ii) вопрос перехода от ЭРОА к ОА в нормировании радона в зданиях, (iii) несоблюдение требований метрологии в МР 2.6.1.0333-23, (iv) вопрос надежности тестирования зданий в МР 2.6.1.0333-23, (v) проблема обоснования регулятором своих решений, (vi) альтернативный метод контроля радона в зданиях на основе рационального подхода.

Ключевые слова:

радон, торон, ЭРОА, помещения, здания, регулирование, норматив, радиационный контроль, оценка соответствия, измерения, метрология, неопределенность, надежность.

А.А.Цапалов¹,
П.С.Микляев², Т.Б.Петрова³,
С.И.Кувшинников⁴

¹ Научно-производственное предприятие «Доза», г. Москва, г. Зеленоград

² Институт геоэкологии им. Е.М. Сергеева РАН, г. Москва

³ Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова», г. Москва

⁴ Федеральный центр гигиены и эпидемиологии, Федеральная служба по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, г. Москва

Настоящая серия публикаций обусловлена необходимостью более глубокого анализа причин кризиса регулирования радона в России [1]. Проблема заключается также в том, что НИИРГ им. П.В. Рамзаева, являющийся, с некоторыми оговорками, регулятором в области контроля облучения населения радоном [3],

вместо конструктивного обсуждения и решения очевидных и давно существующих проблем отказывается признавать само существование кризиса [2].

Первая часть статьи была посвящена детальному анализу тезисов наших оппонентов [2], в котором мы выделили четыре наиболее важных вопроса [3]:

- проблема проведения мероприятий по защите зданий от радона;
- проблема измерений радона и оценки соответствия;
- проблема информирования населения и ответственности за контроль радона;
- проблема разработки национального плана действий по радону.

Проведенный в первой части анализ показал [3], что мнение регулятора, пытающегося опровергнуть существование кризиса в регулировании радона, не имеет строгого (научного) обоснования, подкрепленного набором фактов, и сводится лишь к тому, чтобы продолжать практику существующего регулирования [2], то есть, по сути, отказаться от регулирования радонового риска.

Давно внедренная регулятором через МУ 2.6.1.2838-11 [4] практика тестирования зданий по всей стране (на основе экспрессных измерений), которая недавно была актуализирована в МР 2.6.1.0333-23 [5], не обеспечивает надежность оценки соответствия, а также совершенно не защищена от небрежности либо умышленного нарушения условий измерения. Данные обстоятельства влияют на результат тестирования до такой степени, что даже здания со сверхнормативным содержанием радона можно «обоснованно» признавать безопасными, только чтобы не проводить мероприятия по их защите от радона [3]. Между тем, если метод тестирования зданий был бы надежным и давал воспроизводимые результаты, то проблема эффективного проведения мероприятий по защите зданий от радона была бы существенно ближе к решению.

В этой связи, во второй части статьи более подробно обсуждается состояние и способ решения проблемы измерений радона и оценки соответствия тестируемых помещений зданий требованиям норм радиационной безопасности. Анализуются не только проблемы на методологическом уровне, связанные с вопросами метрологии и надежности тестирования в МР 2.6.1.0333-23, включая предыдущие МУ 2.6.1.2838-11, но и давно назревший вопрос актуализации нормирования радона в зданиях. Поэтому критический анализ систематизирован по следующим шести пунктам:

- вопрос отмены нормирования торона в зданиях;
- вопрос перехода от ЭРОА к ОА в нормировании радона в зданиях;
- несоблюдение требований метрологии в МР 2.6.1.0333-23;
- вопрос надежности тестирования зданий в МР 2.6.1.0333-23;
- проблема обоснования регулятором своих решений;
- альтернативный метод тестирования зданий на основе рационального подхода.

Вопрос отмены нормирования торона в зданиях

Наши оппоненты признают, что присутствие ЭРОА торона в величине действующего норматива «явно избыточно», но связывают это лишь с относительно новыми зданиями, где превентивно проводился радиационный контроль строительных материалов [2]. Регулятор объясняет, что подтвердить или опровергнуть значимый вклад ЭРОА торона в дозу облучения «можно только по результатам радиационного контроля, но в подавляющем большинстве ...

домов он никогда не проводился», поэтому предлагает компромиссный подход, все равно предусматривающий сохранение величины норматива в виде ЭРОА изотопов радона для зданий старой постройки (до 1999 г.) [2]. Однако мы не считаем такой компромисс решением. Приведем еще раз (с некоторым обновлением) обоснование безоговорочной отмены компоненты ЭРОА торона [1].

1. До сих пор отсутствуют необходимые знания о пространственно-временных закономерностях поведения ЭРОА торона в зданиях (в отличие от ОА радона), поэтому не очень понятно, как, исключая тестирование в течение целого года, проводить оценку соответствия среднегодовой ЭРОА торона (или изотопов радона) в помещениях в рамках регламента радиационного контроля, который должен обеспечивать надежность решений не менее 95%. Пробел в этих знаниях объясняется тем, что соответствующих системных исследований не проводилось, скорее всего, по причинам, которые приводятся ниже в пунктах 2, 3 и 4.

Уточним, что недавно был опубликован перспективный метод определения среднегодовой ЭРОА торона в жилых зданиях [6]. Однако этот метод достаточно трудоемкий, да и чересчур шумный для массового использования в жилищах (из-за непрерывной или периодической прокачки воздуха через фильтр в течение 3–5 дней). Кроме того, теоретически оцененная неопределенность метода на уровне 35% пока не вызывает доверия, поскольку прямых измерений среднегодовой ЭРОА торона ни в одном из экспериментальных помещений не проводилось [6]. Кстати, годовые непрерывные периодические измерения ЭРОА торона (хотя бы по несколько измерений в день), необходимые для изучения временных вариаций ЭРОА торона в помещениях зданий, не проводились никогда не только в России, но и в других странах.

2. Необходимо учитывать определенную техническую сложность (соответственно, и большую стоимость) измерений нормативной величины в виде среднегодовой ЭРОА изотопов радона в помещениях (в частности, компоненты ЭРОА торона), учитывая сложность и отсутствие навыков метрологического обеспечения измерений ЭРОА торона [6], по сравнению с измерениями среднегодовой ОА радона в помещениях. Действительно, если достаточно трудоемкое (и весьма дорогое) непрерывное измерение в режиме монитора ЭРОА радона в течение одного года можно выполнить с изрядным усилием, то для непрерывного измерения ЭРОА торона в течение одного года просто не существует средств измерений в Российской Федерации (как и в других странах).

3. Известно, что изотоп Rn-220 (торон), имеющий период полураспада 55 сек., менее распространен, чем изотоп Rn-222 (радон) с периодом полураспада 3,8 суток, поэтому глобальный вклад торона в радиационный риск является незначительным по сравнению с радоном [7]. По данным Института промышленной экологии УрО РАН, средняя ЭРОА торона в зданиях г. Екатеринбурга составляет примерно 0,7 Бк/м³ [6]. Скорее всего, средняя по зданиям ЭРОА торона в России не превышает 1 Бк/м³. Кроме того, в течение нескольких десятилетий санитарно-эпидемиологического надзора за обеспечением радиационной безопасности населения РФ не было сообщений (публикаций) о значимых индивидуальных рисках из-за повышенных уровней ЭРОА торона в зданиях [7], превышающих норматив, в отличие от множества публикаций о сверхнормативном содержании радона.

4. В международной практике регулирования отсутствует ограничение уровня ЭРОА торона, как и ЭРОА изотопов радона в зданиях. Несмотря на существование такого норматива в отечественной практике, измерения ЭРОА торона проводятся очень редко. Фактически все данные,

связанные с контролем нормируемой величины «ЭРОА изотопов радона», реально относятся только к ЭРОА радона.

5. Отмена ЭРОА торона в нормировании может быть осуществлена в ходе предстоящей ревизии НРБ и ОСПОРБ [2], поэтому затрат для этого не потребуется.

Из-за отсутствия надежного инструментария контроля, так и не созданного в течение нескольких десятилетий существования тороновой компоненты норматива, а также учитывая дополнительные обоснования выше, очевидно, не имеет никакой практической пользы ритуал присутствия ЭРОА торона в величине норматива. В то же время упрощение норматива вовсе не отменяет развитие техники измерений и изучение пространственно-временных вариаций ЭРОА торона в зданиях на территории РФ с целью усовершенствования регулирования радона в стране.

Вопрос перехода от ЭРОА к ОА в нормировании радона в зданиях

По вопросу перехода к нормированию содержания радона в помещениях по значению ОА радона (вместо ЭРОА изотопов радона) регулятор дал лишь формальный короткий ответ [2], что «эти вопросы давно обсуждаются на страницах научных изданий», сославшись на несколько работ, которые были опубликованы в 2014 г., и еще одна – в 2019 г. Действительно, проблема такого перехода в нормировании уже десятилетие ждет решения, однако регулятор в своей научной оценке снова не стал обсуждать наше обоснование необходимости перехода, выраженное набором конкретных тезисов [1], которые мы вынуждены повторить с небольшими уточнениями [3].

1. Экспрессные (или мгновенные) измерения ЭРОА радона, широко внедренные регулятором в практику тестирования зданий, не обеспечивают надежность оценки соответствия [7], а более длительные измерения ЭРОА радона, тем более, в течение года вызывают серьезные технические затруднения в отличие от измерений ОА радона.

2. Стоимость средств измерений (СИ) ЭРОА радона, как и самих измерений, более высокая по сравнению со СИ и самими измерениями ОА радона, что подробно обсуждалось в [3].

3. В отличие от измерений ЭРОА радона, измерения ОА радона можно проводить в массовом режиме за счет добровольной оплаты и участия населения в тестировании своих жилищ, внедряя недорогие СИ ОА радона и современные интернет-технологии [3], что в совокупности с применением рационального критерия обеспечивает надежность оценки соответствия не менее 95% [7].

4. Применение единиц ЭРОА в нормировании с возможностью измерений как ЭРОА, так и ОА радона привело к терминологическому хаосу и путанице выражения результатов тестирования зданий, то ли в единицах ОА радона, то ли ЭРОА радона. Даже службы по сертификации СИ радона не являются здесь исключением [3].

5. Средства измерений ОА радона, например, на основе активированного угля (квазиинтегральный метод) или трековой радиометрии (интегральный метод) уже давно и широко используются в отечественной практике тестирования зданий и являются достаточно надежными.

6. По мере внедрения рационального подхода [7] постепенная замена достаточно дорогих, неэффективных и устаревающих профессиональных СИ ЭРОА и ОА радона на существенно более дешевые современные электронные мониторы ОА радона не потребует значительных затрат со стороны аналитических лабораторий.

Длительное (в течение нескольких десятилетий) нормирование в единицах ЭРОА изотопов радона не показало каких-либо преимуществ по сравнению с международной практикой регулирования радона, где всегда применялся норматив (референтный уровень) в единицах ОА радона [7]. Наоборот, отечественное регулирование радона находится в состоянии глубокого кризиса, для преодоления которого, кроме прочего [1], необходим переход в нормировании среднегодового содержания радона в зданиях от ЭРОА изотопов радона к ОА радона. Хотелось бы верить, что регулятор предоставит исчерпывающие соображения (ответы) по каждому из перечисленных выше пунктов (касающихся как отмены нормирования ЭРОА торона, так и перехода к нормированию ОА радона).

Несоблюдение требований метрологии в МР 2.6.1.0333-23

По части метрологического обеспечения в МР 2.6.1.0333-23 упоминаются основополагающий Федеральный закон № 102-ФЗ «Об обеспечении единства измерений», а также межгосударственные стандарты ГОСТ 8.638-2013 «Государственная система обеспечения единства измерений. Метрологическое обеспечение радиационного контроля. Основные положения» и ГОСТ 34100.3-2017 «Неопределенность измерения. Часть 3. Руководство по выражению неопределенности измерения». Однако в нарушение требований Федерального закона № 102-ФЗ и ГОСТ 8.638 документ МР 2.6.1.0333-23, являющийся методикой (методом) измерений в области радиационного контроля и применяемый для оценки соответствия и осуществления мероприятий государственного контроля (надзора), не проходил в уполномоченной организации экспертизу соответствия обязательным метрологическим требованиям, поэтому сведения о нем отсутствуют в Федеральном информационном фонде по обеспечению единства измерений. Тем не менее, оставаясь неаттестованным, документ МР 2.6.1.0333-23 был представлен Главному государственному санитарному врачу Российской Федерации (руководителю Роспотребнадзора) для утверждения, что также является нарушением регламента национального стандарта ГОСТ Р 8.563-2009 «Государственная система обеспечения единства измерений. Методики (методы) измерений». Хотя Федеральный закон № 102-ФЗ достаточно понятно изложен, полезно еще сослаться и на разъяснения в письме Росстандарта № 17867-ЗО/05 от 29.11.2024 [8] по вопросу применения методик (методов) измерений. Согласно этому письму, документ МР 2.6.1.0333-23 является методикой (методом) измерений, поскольку он устанавливает порядок выполнения измерений, включая нормирование показателей точности.

В этой связи необходимо процитировать ошибочное заявление регулятора [9]: «Крайне важно обратить внимание на то, что ни МР 2.6.1.0333-23, ни МУ 2.6.1.2838-11 не являются методиками (методами) измерений: они не задумывались таковыми и не удовлетворяют требованиям, предъявляемым к соответствующим документам Федеральным законом от 26.06.2008 № 103-ФЗ «Об обеспечении единства измерений» (часть 11 статьи 2; части 1 и 2 статьи 5)». Фундаментальная ошибка заключается в том, что как бы ни назывался методический документ (методические рекомендации, методические указания, методика измерений или методика радиационного контроля), Федеральный закон № 103-ФЗ устанавливает четкий регламент аттестации методик (методов) измерений, в том числе документа МР 2.6.1.0333-23, на который, вопреки мнению регулятора, не может распространяться исключение для методик (методов) измерений, которые предназначены для выполнения прямых измерений. Хотя это кажется очевидным, тем не менее,

далее приводится факт отсутствия выполнения прямых измерений при контроле соответствия среднегодовой ЭРОА изотопов радона, который регламентирован МР 2.6.1.0333-23.

Дело в том, что нормируемая величина (ЭРОА изотопов радона в помещении) выражена в НРБ-99/2009 и ОСПОРБ-99/2010 как **среднегодовое значение**. Это означает, что если продолжительность измерения меньше одного года, то такое **измерение среднегодовой ЭРОА изотопов радона не является прямым**. В этом случае недостаточно лишь напрямую измерить ОА или ЭРОА радона (изотопов радона) в воздухе с контролируемой точностью, которая устанавливается для аттестованных средств измерений. Соответственно, возникает необходимость дополнительно учитывать неопределенность временных вариаций радона (и торона), которая увеличивается с уменьшением продолжительности измерений [7]. Если все измерения при оценке соответствия помещений зданий (и сооружений) проводились бы в течение целого года, то измерения среднегодовой ЭРОА изотопов радона, действительно, были бы прямыми, а решения регулятора по части контроля радона в зданиях (и сооружениях) не вызывали бы возражений. Однако в МР 2.6.1.0333-23, согласно п. 5.12, допускаются три режима измерений: экспрессный (продолжительность которого не указана, но обычно составляет минуты и не превышает часа), квазиинтегральный (продолжительностью не менее 3 суток) и интегральный (продолжительностью не менее 30 суток), то есть о продолжительности каждого измерения в течение одного года речь не идет. Более того, если достаточно трудоемкое (и весьма дорогое) прямое измерение ЭРОА радона в течение одного года можно выполнить (в режиме монитора), прилагая изрядное усилие, то для прямого измерения ЭРОА торона в течение одного года просто не существует средств измерений в Российской Федерации, о чем уже сообщалось в предыдущем разделе. Поэтому **невозможно, в принципе, выполнить прямое измерение нормативной величины в виде среднегодовой ЭРОА изотопов радона в воздухе помещений**.

В случае проведения метрологической экспертизы разработчикам МР 2.6.1.0333-23 по части контроля радона в помещениях было бы указано на несоответствие требованию п. 7.4 ГОСТ 8.638, касающегося оценки неопределенности ($P = 0,95$) измеренного (рассчитанного по измерению) значения контролируемой величины, которая в данном случае проводится с целью принятия решения о соответствии контролируемого параметра установленному нормативу. Хотя, на первый взгляд, это требование кажется формально выполненным в п. 2.6 МР 2.6.1.0333-23, в котором суммарная неопределенность $U(C)$ выражена в формуле (4), однако составляющие этой неопределенности, идентификация которых играет особо важную роль в метрологии, согласно ГОСТ 34100.3, указаны с грубой ошибкой. Ведь среди составляющих неопределенности отсутствует такая важная (временная) компонента $U(C)$, как неопределенность временных вариаций радона $U_V(t)$ [7], которая зависит от продолжительности измерений. В документе МР 2.6.1.0333-23 ошибочно рассматривается лишь инструментальная составляющая неопределенности $U(C)$, тем более, подмена временной (ключевой) компоненты на практически бесполезный учет тороновой компоненты (см. предыдущие разделы) создает иллюзию адекватного применения рекомендаций ГОСТ 34100.3. Уточним, что определения временной и инструментальной неопределенностей приводятся в соответствующем разделе альтернативного метода контроля радона в зданиях, который представлен ниже.

Наши оппоненты справедливо утверждают [10], что «достоверность оценки нормируемого показателя – среднегодовой эквивалентной равновесной объемной активности (ЭРОА) изотопов радона в воздухе помещений – увеличивается с ростом продолжительности измерения».

Тот же смысл приводится в вышеупомянутом п. 5.12 МР 2.6.1.0333-23, но с менее четким выражением сути: «... точность оценки ЭРОА радона возрастает с увеличением продолжительности пробоотбора». Тогда, следуя этой всем понятной закономерности, наоборот, снижение продолжительности измерения (или пробоотбора) будет приводить к увеличению временной компоненты неопределенности $U(C)$. Сам же регулятор в своих первых МУ 2.6.1.715-98 [11] приводит коэффициент вариации во времени ЭРОА радона (выражающий запас надежности оценки соответствия), значения которого увеличиваются с уменьшением продолжительности измерений (либо снижаются с увеличением продолжительности измерений). Например, для экспрессных измерений преобразование этого коэффициента [7] в величину временной компоненты неопределенности $U(C)$ дает значения 200% для теплого сезона и 50% для холодного сезона, скорее всего, при коэффициенте охвата $k = 1$, действительное значение которого, как и доверительной вероятности, неизвестно. После накопления более обширного статистического материала значение этой же (временной) компоненты неопределенности для экспрессных измерений оценивалось нами (независимо от сезона) на уровне 360% (при $P > 0,95$) в статье [12].

Однако, несмотря на вполне логичные соображения и факты выше, регулятор без убедительного обоснования принял сначала в МУ 2.6.1.2838-11, а затем и в МР 2.6.1.0333-23 (п. 4.20) совершенно необъяснимые значения коэффициента вариации K_f , величина которого почему-то перестала зависеть от продолжительности измерений [7]. Причем один и тот же коэффициент произвольно применяется как к радоновому, так и тороновому слагаемому в формулах (11) и (12), хотя никаких соответствующих исследований регулятор не проводил (по крайней мере, не публиковал их результаты). Преобразование коэффициента K_f в величину временной компоненты неопределенности $U(C)$ по аналогии с [7] дает значения 30% (при неизвестном коэффициенте охвата) для теплого сезона и 0% для холодного сезона, независимо от продолжительности (режима) измерений. По поводу сезонного отличия значений коэффициента K_f важно уточнить, что анализ накапливающихся в мире результатов годовых и сезонных измерений ОА радона в зданиях свидетельствует об отсутствии строгой закономерности температурного (или сезонного) влияния, которую можно было бы применять к любым помещениям и зданиям [7]. Поэтому, несмотря на то, что чаще встречаются сообщения (публикации) о более высоких уровнях радона в холодный период года, отдельный учет сезонного фактора не способствует повышению качества оценки соответствия помещений зданий требованиям норм безопасности (или индивидуального риска) [7]. Учет сезонного фактора может быть полезен лишь при уточнении коллективных рисков. Уместно также напомнить, что алгоритм определения и сами значения временной неопределенности $U_V(t)$, которые зависят от продолжительности измерений и режима вентиляции, неоднократно публиковались в журнале «Радиационная гигиена» [7,12]. Напомним, что в последней публикации [7] значения $U_V(t)$ были получены путем статистического анализа обширных массивов разностей (отклонений) между среднегодовыми и измеренными с разной продолжительностью значениями ОА радона в выборке зданий с охватом 1,2 млн значений разностей [7,13]. Эта выборка включала здания, расположенные на территориях с разной геологией и климатом. Такой подход позволяет учесть совокупное влияние всех антропогенных и естественных факторов (включая сезонное влияние) на поведение радона во времени в помещениях представительной выборки зданий [7].

Таким образом, пренебрегая ценнейшим начальным опытом регулирования радона, заложенным еще профессором Э.М. Крисюком (создавшим первые МУ 2.6.1.715-98), регулятор по неизвестным причинам, вопреки здравому смыслу решил с 2011 г. отменить, по сути, учет временной (ключевой) компоненты неопределенности, между прочим, достигающей 300%, 140% и 100% (для этих значений $P = 0,95$) при экспрессных, квазиинтегральных (3 суток) и интегральных (30 суток) измерениях, соответственно [7,12], но при этом необоснованно ввел очень низкое значение 30% (только для теплого сезона), скорее всего, лишь ради демонстрации учета временных вариаций радона. Даже после многолетних системных исследований в разных зданиях, а затем публикации значений временной неопределенности в 2018 г. [12], которые были позже подтверждены на основе более обширного статистического материала в публикациях 2021–2023 гг. [7,13,14], регулятор по каким-то необъяснимыми для нас причинам все так же не принял во внимание ключевую роль временной неопределенности при подготовке МР 2.6.1.0333-23.

Поскольку наши оппоненты в своей (метрологически неаттестованной) методике радиационного контроля, предназначенной для оценки соответствия зданий требованиям норм радиационной безопасности, не учитывают ключевую компоненту неопределенности, то просто не имеет смысла обсуждение предложенной в МР 2.6.1.0333-23 стратегии однократных или многократных измерений разной длительности, а также разного рода устанавливаемых ограничений и количественных критериев, включая алгоритм оценки соответствия. Все предложенные в МР 2.6.1.0333-23 схемы измерений среднегодовой ЭРОА изотопов радона не имеют метрологического обеспечения, поскольку продолжительность предусмотренных в них одного или нескольких последовательных измерений меньше одного года. Тем более не имеет смысла обсуждение структуры документа, а также порой слишком громоздкого и не всегда четкого изложения сути параграфов, количество которых в одном из разделов доходит до 30.

Полезно напомнить существующую уже многие годы проблему оценивания неопределенности измерений, решение которой до сих пор вызывает определенные затруднения даже среди аккредитованных испытательных лабораторий в рамках реализации ГОСТ ISO/IEC 17025-2019 «Общие требования к компетентности испытательных и калибровочных лабораторий». В частности, требования этого ГОСТ формулируются следующим образом:

«7.6 Оценивание неопределенности измерений

7.6.1 **Лаборатории должны определять вклад(ы) в неопределенность измерений.** При оценивании неопределенности измерений все существенные вклады, в том числе связанные с отбором образцов, должны учитываться с применением соответствующих методов анализа.

...

7.6.3 **Лаборатория, выполняющая испытания, должна оценивать неопределенность измерений.** В тех случаях, когда метод испытаний исключает строгую оценку неопределенности измерений, оценивание должно проводиться на основе понимания теоретических принципов или практического опыта выполнения метода».

Поскольку в России прямых измерений в течение одного года нормируемой среднегодовой ЭРОА изотопов радона не проводится, но при этом не учитывается вклад ключевой компоненты неопределенности, связанной с временными вариациями радона в зданиях, то выходит, что указанные выше требования ГОСТ ISO/IEC 17025-2019 не выполняются лабораториями, которые аккредитованы в области контроля радона в зданиях. Если проблема оценивания неопределенности измерений

остается нерешенной даже на уровне НИИРГ им. П.В. Рамзаева, внедряющего документы типа МР 2.6.1.0333-23, можно ли ожидать и требовать ее решения на уровне испытательных и калибровочных лабораторий? Поэтому мы призываем руководящий состав Федеральной службы по аккредитации (Росаккредитация), Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии (Росстандарт), а также Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека (Роспотребнадзор) обратить внимание на фактическое соответствие обязательным метрологическим требованиям применяемых методик (методов) измерений, разработанных ФБУН НИИРГ им. П.В. Рамзаева с целью радиационного контроля. Подтверждение такого соответствия должно осуществляться не руководителем Федеральной службы, как в случае с МР 2.6.1.0333-23, а путем аттестации методик (методов) измерений уполномоченным органом с передачей сведений в Федеральный информационный фонд по обеспечению единства измерений, согласно требованиям Федерального закона № 102-ФЗ «Об обеспечении единства измерений».

Учитывая весьма тревожные факты, изложенные выше, действие неаттестованного и метрологически не обеспеченного документа МР 2.6.1.0333-23, нарушающего требования Федерального закона № 102-ФЗ «Об обеспечении единства измерений», а также межгосударственных стандартов: ГОСТ 8.638-2013, ГОСТ 34100.3-2017, ГОСТ ISO/IEC 17025-2019 и национального стандарта ГОСТ Р 8.563-2009 должно быть прекращено.

В этом же разделе уместно более подробно по сравнению с беглым упоминанием в первой части [3] обсудить замечание регулятора [2,9], который совершенно необоснованно считает, что в таких средствах измерений как «КАМЕРА-01», РАА-20П2 «Поиск» и РАА-3-01 «АльфаАЭРО» не учитываются «современные требования к представлению результатов радиационного контроля, установленные п. 7.4 ГОСТ 8.638, и подходы к выражению неопределенности измерений, установленные ГОСТ 34100.3». Кстати, оба ГОСТ мы неоднократно упоминали выше, включая п. 7.4. в контексте несоответствия самих МР 2.6.1.0333-23 (по части контроля радона в помещениях) требованиям метрологии.

Важно понимать, что в отличие от методик на СИ, регламентирующих процедуру прямого измерения того или иного параметра, методики радиационного контроля (МРК), о которых идет речь в п. 7.4 ГОСТ 8.638, оперируют совокупностью результатов прямых измерений (одного или нескольких параметров), используя эти результаты в метрологически верифицированном алгоритме обработки. Поэтому прежде всего необходимо обеспечить единство выражения результатов прямых измерений, включая оценку неопределенности, согласно ГОСТ 34100.3. В этом отношении все вышеперечисленные СИ выражают результат прямого измерения в виде « $X \pm \Delta X$ » ($k = 2$), либо « $\langle (X + \Delta X) \rangle$ », если $\Delta X / X > 1$, либо « $\langle \Delta X \rangle$ », если $X < 0$, при этом в любом случае в базу данных записываются значения X и ΔX (в том числе отрицательное значение X). Такой подход полностью отвечает требованиям ГОСТ 34100.3 и позволяет использовать выраженные в таком виде результаты прямых измерений в разных МРК.

Обсуждаемое замечание регулятора на самом деле выражает лишь желание внедрения критериев оценки соответствия МУ 2.6.1.2838-11 или МР 2.6.1.0333-23 в алгоритмы обработки и вывода результатов СИ, либо в прилагаемое к ним программное обеспечение. Однако такое желание следует рассматривать не как требование п. 7.4 ГОСТ 8.638, а лишь как рекомендацию регулятора для производителей СИ. Здесь важно снова обратить внимание, что ни МУ 2.6.1.2838-11, ни МР 2.6.1.0333-23 не были аттестованы (в нарушение требований законодательства РФ) и

не соответствуют требованиям метрологии, согласно подробному разбору и доказательствам выше.

После представленного анализа достаточно странных решений и замечаний наших оппонентов весьма полезно в завершение раздела о несоблюдении требований метрологии в МР 2.6.1.0333-23 процитировать целиком один из параграфов ГОСТ 34100.3, на который они часто ссылаются:

«3.4.8 Хотя настоящее Руководство устанавливает общую методологию оценивания неопределенности, его применение требует от пользователя критического мышления, интеллектуальной честности и компетентности. Оценивание неопределенности нельзя рассматривать как типовую задачу, требующую применения стандартных математических процедур. От пользователя требуется детальное знание природы измеряемой величины и процедуры измерения. Поэтому качество оценки неопределенности, приписанной результату измерения, зависит в конечном счете от понимания, критического анализа и профессиональной добросовестности всех лиц, принимающих участие в ее получении».

Вопрос надежности тестирования зданий в МР 2.6.1.0333-23

Проблема надежности тестирования зданий, обсуждение и решение которой является первоочередной задачей в регулировании радона, к сожалению, не вызвала отклика наших оппонентов в их научной оценке [2] нашего критического обзора [1]. Эта наиважнейшая проблема поднималась нами ранее, перед вводом в действие МУ 2.6.1.2838-11 [15] и МР 2.6.1.0333-23 [7], тем не менее, ни одно (!) из замечаний, в том числе, фундаментального характера, не было принято во внимание регулятором. Более того, нововведение в п. 5.10 МР 2.6.1.0333-23 позволяет теперь проводить экспрессные измерения уже через один час (!) после проветривания помещений в эксплуатируемых зданиях и сооружениях. Всем специалистам известно, что в этом случае даже в помещениях со сверхвысокими уровнями радона его содержание будет лишь незначительно выше, чем снаружи зданий (в атмосферном воздухе), поскольку накопление радона в помещениях – довольно инерционный процесс. В предыдущих МУ 2.6.1.715-98 и МУ 2.6.1.2838-11 хотя бы требовалось выдерживать помещения закрытыми не менее 12 часов до проведения экспрессных измерений. Даже если добросовестно выдерживать помещения закрытыми не менее 12 часов, то низкие значения экспрессных измерений (которые в основном проводятся в дневное время, когда ОА радона обычно самая низкая за сутки) вовсе не служат показателем низкого среднегодового уровня радона вследствие очень больших временных вариаций даже в постоянно закрытых помещениях, что наглядно показано, например, в [7]. Весьма вредное нововведение в п. 5.10 не просто еще больше снижает и без того неустановленную регулятором надежность тестирования зданий и сооружений, но, что особо тревожно, повышает вероятность практически до 100% признания безопасными по радону всех тестируемых помещений вне зависимости от фактического уровня радона (даже выше норматива), квалификации операторов и качества применяемых СИ. Поэтому измерения в экспрессном режиме, продолжительность которых обычно составляет минуты и не превышает часа, необходимо исключить из практики контроля радона в зданиях, если речь идет об оценке их соответствия требованиям норм радиационной безопасности. Напомним, что измерения в экспрессном режиме, кроме России и нескольких стран ближайшего зарубежья, не проводятся ни в Европе, ни на других континентах вследствие неприемлемо высокой временной неопределенности оценки среднегодовой ОА

радона (достигающей 300%) [12]. Например, минимальная продолжительность радонового теста в США составляет 2 суток, а в Европе – 2 месяца [7]. Тем не менее, игнорируя не только научное обоснование [7], но и мировой опыт, коллеги из НИИРГ им. П.В. Рамзаева продолжают в МР 2.6.1.0333-23 весьма вредную традицию применения экспрессных измерений, которые за последние почти 30 лет внедрены в России до такой степени, что уже более 90% всех радоновых тестов проводится в экспрессном режиме [7]. Это означает, что практически все ранее обследованные здания в России необходимо тестировать повторно наряду с десятками миллионов еще не обследованных зданий, но с применением надежного альтернативного метода контроля радона в зданиях, который детально представлен ниже. Это, возможно, одна из причин, по которой регулятор устраняется от обсуждения вопросов метрологического обеспечения и надежности тестирования зданий и продолжает игнорировать ключевую компоненту неопределенности оценки соответствия.

Создается ощущение, что регулятор решил бороться с радоном не путем повышения надежности выявления радоноопасных зданий и внедрения передового опыта проведения МЗР [1], а путем «усовершенствования» методики тестирования зданий таким образом, чтобы в 100% случаев тестирования даже проблемные здания (со сверхнормативным содержанием радона) не выглядели таковыми. Такое весьма тревожное ощущение подкрепляется еще и тем фактом, что после серий публикаций в СМИ сразу нескольких субъектов РФ о повышенных содержаниях радона в зданиях детских учреждений [16], приведших к их закрытию, регулятор добавил в МР 2.6.1.0333-23 еще одно нововведение, согласно которому, по сути, внедряется контроль индивидуальной экспозиции в зданиях с некруглосуточным пребыванием людей. Причем такой контроль предлагается проводить только в дневное время (в период присутствия людей), когда концентрации радона в помещениях обычно самые низкие в течение суток [17]. Кстати, если следовать такой логике, то контроль радона в жилищах должен проводиться тоже только в период присутствия людей, то есть в вечернее и ночное время, когда обычно наблюдается максимальная ОА радона. Однако такой строгий избирательный контроль индивидуальной экспозиции кажется неэффективным и излишним.

Видимо, за счет применения таких двух нововведений, как (i) экспрессные измерения только в дневное время и (ii) всего лишь через час после проветривания, работа закрытых детских учреждений была возобновлена после такого повторного тестирования [9,16]. При этом очевидно, что «улучшение» ситуации было достигнуто чисто виртуально, путем намеренного ослабления критерия оценки соответствия, а не реальных мер по снижению уровней радона в зданиях. Кажется, лишь в одном среди таких проблемных зданий детских учреждений были проведены МЗР, но опять с применением пассивной защиты [18], которая обычно мало эффективна [3].

В связи с нововведением контроля индивидуальной экспозиции в зданиях с некруглосуточным пребыванием людей необходимо обратить внимание на противоречие, заключающееся в том, что область применения МР 2.6.1.0333-23 касается оценки соответствия зданий и сооружений, а не индивидуальной экспозиции требованиям гигиенического норматива. Тем более, сам регулятор напоминает, «что в российском санитарном законодательстве облучение населения за счет природных источников ионизирующего излучения (ПИИИ) не нормируется как таковое» [2].

Здесь весьма полезно процитировать целиком один из пунктов 126 публикации МКРЗ [19]: «(п) Как и для других источников облучения, национальные органы власти устанавливают

национальные референтные уровни доз облучения и производные референтные уровни концентрации, проводят оптимизацию защиты в своих странах. Цель состоит в снижении как общего риска для всего населения, так и индивидуального риска наиболее облучаемых лиц. В обоих случаях процесс реализуется через управление зданиями, **а не индивидуальной экспозицией**, и должен привести к снижению объемной активности радона в воздухе помещения до разумно достижимого значения – ниже национального референтного уровня».

К сожалению, вместо оптимизации защиты через управление зданиями, например, путем эффективного и надежного выявления проблемных зданий с последующим проведением эффективных защитных мероприятий, следуя рекомендациям МКРЗ, коллеги из НИИРГ им. П.В. Рамзаева, похоже, действительно предлагают решить радоновую проблему в стране лишь за счет внедрения в практику регулирования метрологически неаттестованных МР 2.6.1.0333-23 с неопределенной надежностью и намеренно ослабленным критерием принятия решений.

Проблема обоснования регулятором своих решений

Хотелось бы понять, на каком научно-исследовательском материале коллегам из НИИРГ им. П.В. Рамзаева удастся обосновывать и внедрять в практику тестирования радона в зданиях свои весьма сомнительные решения, которые, по нашему мнению, во многом способствовали развитию кризиса регулирования радона в России, масштаб и основные причины которого мы обсуждали ранее [1,3]. Например, в рамках разработки МУ 2.6.1.2838-11 и уточнения коэффициента вариации K_f регулятор не проводил специальных научных исследований для изучения закономерности временных вариаций радона в зданиях. Для обоснования ввода в действие МУ 2.6.1.2838-11 с радикально измененными значениями K_f , по сравнению с первоначально применяемыми в МУ 2.6.1.715-98, регулятор опубликовал анализ, в котором использовались только результаты рутинного радиационного контроля сдаваемых в эксплуатацию жилых и общественных зданий в Санкт-Петербурге и Ленинградской области [20]. Однако специалистам известно, что результаты такого рутинного контроля можно использовать для оценки доз и изучения пространственного распределения концентрации радона в зданиях, но они совершенно бесполезны для изучения поведения радона во времени, тем более, оценки коэффициента временных вариаций. Тем не менее, в [20] был сделан вывод, что временные вариации ЭРОА радона в помещениях зданий незначительные. Ошибочность таких выводов, как и самого анализа в [20], подробно обсуждалась в [15]. Однако несмотря на обоснованную критику, МУ 2.6.1.2838-11 все равно были введены в действие без единой правки, релевантного научного обоснования и публичного ответа на критику, игнорируя мнение даже специалистов из Роспотребнадзора [15].

Позднее, в рамках подготовки и обоснования МР 2.6.1.0333-23 по части контроля радона в зданиях и сооружениях, коллеги из НИИРГ им. Рамзаева провели специальные исследования в зданиях нескольких детских учреждений с повышенным и сверхнормативным содержанием радона [10,16,21], которые расположены в Ленинградской области. Однако дополнительных специальных исследований ни в жилых, ни в производственных зданиях не проводилось вообще. Цель исследований, например, в работе [10] была определена как «выработка рекомендаций по проведению контрольно-надзорных мероприятий в эксплуатируемых общественных зданиях с некруглосуточным пребыванием людей на основе результатов анализа опыта практического применения различных методов измерения содержания радона в воздухе помещений для оценки

среднего его содержания в рабочее время в режиме нормальной эксплуатации зданий». Уточним, если речь идет о научном исследовании для усовершенствования метода контроля радона в зданиях, то в рамках процитированной цели главная задача исследований, очевидно, должна заключаться в обеспечении (или повышении) надежности оценки соответствия тестируемых объектов требованиям норм безопасности в заданных (более оптимальных или расширенных) условиях проведения контроля. Иначе, ради чего усовершенствовать методику радиационного контроля в рамках научного исследования? Однако термин «надежность» встречается лишь однажды в одном и том же контексте только в [10] и п. 5.19 МР 2.6.1.0333-23, где сообщается в скобках, что «надежность такой оценки гарантируется консервативностью результатов, получаемых этим методом». Гарантия надежности в радиационном контроле имеет четкое количественное выражение, которое приводится в п. 7.4 ГОСТ 8.638. Поэтому по каждому из условий измерений (в экспрессном, квазиинтегральном или интегральном режимах) должна оцениваться неопределенность измерения среднегодовой (а также средней за рабочее время) ЭРОА радона (при $P = 0,95$ или $k = 2$), которая, как хорошо известно, зависит от продолжительности измерений, а также других условий тестирования зданий. Однако в МР 2.6.1.0333-23 ни в одной из формул оцениваемая неопределенность не зависит от продолжительности измерений. В публикациях с обоснованием МР 2.6.1.0333-23 [10,16] также не приводится ни одной формулы, а такие термины как «неопределенность» или «точность» не используются вообще. Более того, во всех трех публикациях [10,16,21] для обоснования МР 2.6.1.0333-23 приводятся таблицы и рисунки (графики), содержащие разнообразные данные, которые не связаны с количественным определением надежности разных схем (режимов) измерений и, тем более, эти данные никак не используются в самих МР 2.6.1.0333-23. Справедливости ради, стоит также упомянуть опубликованную уже после утверждения МР 2.6.1.0333-23 статью с их дополнительным обоснованием [9], в которой имеется раздел «Оценка неопределенности измерений», содержащий, кроме все тех же необоснованных упреков в отношении СИ, которые мы обсуждали выше, еще и рекомендации с формулами для оценки неопределенности измерений. Анализ этого раздела показывает, однако, что приведенные формулы не имеют отношения к контролю радона в помещениях.

Кроме того, для изучения, а точнее, подтверждения известной закономерности суточного тренда ОА радона в зданиях (снижается в дневное время), которая описана, например, в Докладе НКДАР ООН Генеральной Ассамблее за 2000 год [17], совершенно не требуются специальные исследования, о важности проведения которых сообщают коллеги из НИИРГ им. П.В. Рамзаева [10]. Также весьма удивляет попытка оценки эффективной годовой дозы облучения обучающихся на основе нескольких экспрессных (!) измерений в зданиях детских учреждений (обычно измерения с такой целью проводятся около года), при этом в жилищах детей (или подростков) концентрация радона даже не измерялась, просто использовались усредненные данные по региону [16].

Проведенный выше анализ публикаций [10,16,21] свидетельствует об отсутствии четко выраженной цели научных исследований по усовершенствованию контроля радона в зданиях, которые планировал регулятор в рамках отраслевой научно-исследовательской программы Роспотребнадзора на 2021–2025 гг. [9]. Кроме того, в этих работах отсутствует релевантный обзор литературы (по теме) и адекватная формулировка задач исследований, позволяющих достичь поставленную цель эффективным способом. В этой связи удивляет пренебрежение регулятора

примерами, опубликованными в его же журнале еще в 2010 г. [15] и затем в 2018 г. [12], касающихся организации исследований для оценки коэффициента (неопределенности) временных вариаций радона в зданиях с учетом продолжительности измерений. В данном случае, оптимальным решением было бы проведение в течение целого года непрерывных измерений ОА радона (с периодом регистрации 1 или 3 часа) в максимально возможном количестве помещений во всех зданиях детских учреждений, в которых регулятор проводил измерения [10,16,21]. Для непрерывного мониторинга можно было бы использовать хорошо известный, вполне надежный и относительно недорогой радон-монитор типа RadonEye Plus2 [2,14], либо его аналог. Алгоритм преобразования и статистической обработки результатов непрерывных периодических измерений ОА радона в течение одного года, позволяющий оценить неопределенность временных вариаций радона (при $P = 0,95$) с учетом продолжительности измерений, приводился и ранее [22], а затем усовершенствовался в работе [7].

Приведенный выше анализ обоснования регулятором своих решений показывает, что имеющегося у регулятора «опыта практического применения различных методов измерения содержания радона в воздухе помещений для оценки среднего его содержания в рабочее время в режиме нормальной эксплуатации зданий» [10], положенного в основу МР 2.6.1.0333-23, критически недостаточно для разработки надежного метода контроля радона в зданиях. Особую же тревогу вызывают два нововведения (обсуждавшиеся в предыдущем разделе), снижающие и без того неустановленную надежность радонового контроля зданий и эффективность подходов регулирования радона в целом.

Завершить раздел, касающийся проблемы обоснования регулятором своих решений, хотелось бы простым вопросом. Наверное, многим покажется недопустимым, чтобы специалисты в области измерений (технических, геологических и смежных наук) занимались решением медицинских проблем без участия медиков. Тогда почему сотрудники НИИРГ им. П.В. Рамзаева (в основном медики и биологи) занимаются разработкой методик (методов) измерений в области радиационного контроля, напрочь отстранив и даже не консультируясь со специалистами по измерениям?

Альтернативный метод контроля радона в зданиях на основе рационального подхода

Помимо жесткой, но, как нам кажется, вполне обоснованной критики МР 2.6.1.0333-23, мы предлагаем сообществу специалистов и просто интересующимся коллегам критически оценить альтернативный метод контроля радона в зданиях, проект которого приводится в конце статьи под рабочим названием «Оценка соответствия помещений зданий требованиям норм радиационной безопасности по ограничению содержания радона в воздухе». В отличие от разработки МР 2.6.1.0333-23, которая финансировалась в рамках отраслевой научно-исследовательской программы Роспотребнадзора на 2021–2025 гг. [9], разработка альтернативного метода не имела финансирования и является личной инициативой авторов, которые профессионально глубоко вовлечены в обсуждаемую тему как специалисты по измерениям. Благодаря системной научно-исследовательской работе альтернативный метод обеспечивает надежность решений не менее 95% при простом алгоритме оценки соответствия на основе рационального подхода [7], соответствия требованиям упомянутых выше стандартов: ГОСТ 8.638-2013, ГОСТ 34100.3-2017, ГОСТ ISO/IEC 17025-2019 и ГОСТ Р 8.563-2009.

Суть и обоснование альтернативного метода на основе рационального подхода изложены в самом документе (см. ниже), а именно, в его отдельном разделе под названием «Принцип измерений и оценки соответствия». Этот раздел может показаться слишком подробным и большим, однако содержащиеся в нем сведения особенно полезны не только специалистам, но и для информирования населения. Перечисленные в документе процедуры и используемые количественные данные подкреплены ссылками. Качество измерений и надежность принятия решений обеспечиваются за счет контроля и управления основными компонентами неопределенности оценки соответствия, чему посвящены два приложения под названиями «Временная компонента неопределенности оценки соответствия» и «Инструментальная компонента неопределенности оценки соответствия».

Важно подчеркнуть, что благодаря релевантной постановке цели и задач научных исследований, проводившихся нами на системной основе, впервые удалось добиться строгого метрологического обеспечения радиационного контроля даже такой весьма нестабильной величины как концентрация радона в воздухе помещений зданий. Метрологическая экспертиза (аттестация) альтернативного метода будет проведена в уполномоченной организации после сбора и учета всех замечаний от заинтересованных организаций и отдельных лиц (которые можно присылать на e-mail, указанный в конце статьи). Заранее отметим, что при метрологической экспертизе основное обсуждение, вероятно, может быть сфокусировано на следующих формальных вопросах:

- регламентация диапазонов измерений ОА радона, согласно п. 7.3 ГОСТ 8.638;
- регламентация максимальной неопределенности измерений, согласно п. 7.3 ГОСТ 8.638;
- допустимость участия в радиационном контроле жилых зданий неспециалистов (жителей, риэлторов и др.) с применением непрофессиональных средств измерений.

Хотя решения по этим вопросам уже имеются в проекте альтернативного метода, важно добиться их согласования с метрологическим органом, что позволит в полной мере реализовать предложенный метод контроля радона в зданиях на основе рационального подхода [7].

Заключение

1. Необходим переход в нормировании содержания радона в воздухе помещений зданий от среднегодовой ЭРОА изотопов радона к среднегодовой ОА радона, что будет способствовать преодолению кризиса и повышению эффективности регулирования радона.

2. Необходимо исключить из практики контроля радона в зданиях весьма вредную традицию измерений в экспрессном режиме (распространенную только в России и нескольких странах ближнего зарубежья), продолжительность которых обычно составляет несколько минут. Продолжительность измерений должна составлять не менее двух суток, что научно обосновано и соответствует международной практике.

3. Документ МР 2.6.1.0333-23 (как и предыдущие МУ 2.6.1.2838-11) был введен в действие с нарушением Российского законодательства, в частности, требования Федерального закона № 102-ФЗ «Об обеспечении единства измерений», касающегося подтверждения соответствия методик (методов) измерений обязательным метрологическим требованиям к измерениям путем аттестации методик (методов) измерений, к числу которых относится этот документ. Кроме того, неаттестованные МР 2.6.1.0333-23 не соответствуют требованиям метрологии, которые выражены в ГОСТ 8.638-2013 и ГОСТ Р 8.563-2009, а также ГОСТ 34100.3-2017, и поэтому не обеспечивают надежность решений при оценке соответствия тестируемых помещений зданий

требованиям Норм радиационной безопасности. Также имеет место несоответствие требованиям ГОСТ ISO/IEC 17025-2019. Более того, ввод в действие МР 2.6.1.0333-23 не имеет релевантного научного обоснования.

Учитывая эти весьма тревожные факты, действие документа МР 2.6.1.0333-23 должно быть прекращено.

4. Вместо МР 2.6.1.0333-23 в действие может быть введен (после обсуждения, доработки и метрологической аттестации) научно обоснованный метод, представленный для широкого обсуждения под рабочим названием «Оценка соответствия помещений зданий требованиям норм радиационной безопасности по ограничению содержания радона в воздухе».

5. Учитывая п. 3 и актуальность проблемы оценивания неопределенности измерений, решение которой до сих пор вызывает существенные трудности даже среди аккредитованных испытательных лабораторий в рамках реализации ГОСТ ISO/IEC 17025-2019, необходимо обратить внимание руководящего состава Федеральной службы по аккредитации (Росаккредитация), Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии (Росстандарт), а также Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека (Роспотребнадзор) на фактическое соответствие обязательным метрологическим требованиям применяемых методик (методов) измерений в области радиационного контроля. Подтверждение такого соответствия должно осуществляться путем аттестации методик (методов) измерений уполномоченным органом с передачей сведений в Федеральный информационный фонд по обеспечению единства измерений, согласно требованиям Федерального закона № 102-ФЗ «Об обеспечении единства измерений».

6. При разработке методических документов, как и организации научного исследования, очень важно объективно оценивать область знаний и навыков команды. В противном случае благие намерения приводят к кризисной ситуации. По всей видимости, научная специализация, область знаний и навыков лишь специалистов ФБУН НИИРГ им. П.В. Рамзаева не достаточны для профессиональной деятельности, связанной с разработкой методик (методов) измерений в области радиационного контроля зданий или проведением мероприятий по защите зданий от радона. По крайней мере, для такой деятельности необходимо дополнительно привлекать профессиональных специалистов соответствующего профиля с широким обсуждением проекта документа всеми участниками процесса. Совершенно неприемлема сложившаяся ситуация, когда разработка методов радиационного контроля, применяемых разными аккредитованными лабораториями (не только в составе подразделений Роспотребнадзора), проводится келейно, без информирования ведущих специалистов и без широкого общественного обсуждения, без серьезного рецензирования и экспертизы проекта документов перед их вводом в действие. Необходимо принять меры для прекращения подобной практики, хотя бы потому, что она противоречит основам антикоррупционного законодательства.

Заключение (общее по двум частям)

1. К сожалению, приходится признать, что последнее время решения и действия, касающиеся регулирования радона в стране, не способствуют декларируемому «повышению качества жизни населения России» (www.niirg.ru/Fields.htm), а скорее даже мешают снижению радонового риска, намеренно или неосознанно препятствуя развитию массового тестирования зданий и мероприятий в целях защиты от радона.

2. Для преодоления кризиса в регулировании радона необходимо завершить формирование с официальным признанием (статусом) межведомственной радоновой группы, которая будет разрабатывать решения и согласованные предложения по актуализации всех уровней системы обеспечения радиационной безопасности по части регулирования радона, включая разработку Концепции и Национального плана действий.

3. Необходима разработка Концепции и Национального плана действий по защите населения РФ от радиационного риска, обусловленного внутренним облучением за счет радона в зданиях (где люди проводят 80–90% времени) на уровне Федеральной целевой программы (ФЦП), основные направления (задачи) которой были предложены в [1].

4. Необходима реализация Национального плана действий по радону в составе ФЦП «Обеспечение ядерной и радиационной безопасности на 2016–2020 гг. и на период до 2035 г.», либо в рамках отдельной ФЦП.

Литература

1. Цапалов А.А., Микляев П.С., Петрова Т.Б., Кувшинников С.И. Кризис регулирования радона в России: масштаб проблемы и предложения по исправлению // АНРИ. 2024. № 1(116). С. 3-29. DOI: 10.37414/2075-1338-2024-116-1-3-29.
2. Романович И.К., Кормановская Т.А., Кононенко Д.В. К вопросу регулирования радона в Российской Федерации. Дискуссия по материалам публикации «Кризис регулирования радона в России: масштаб проблемы и предложения по исправлению» // Радиационная гигиена. 2024. Т. 17, № 2. С. 128-137. DOI: 10.21514/1998-426X-2024-17-2-128-137.
3. Цапалов А.А., Микляев П.С., Петрова Т.Б., Кувшинников С.И. Кризис регулирования радона в России: дискуссия с регулятором по актуальным вопросам. Часть 1 // АНРИ. 2024. № 4(119). С. 70-89. DOI: 10.37414/2075-1338-2024-119-4-70-89.
4. МУ 2.6.1.2838-11. Радиационный контроль и санитарно-эпидемиологическая оценка жилых, общественных и производственных зданий и сооружений после окончания их строительства, капитального ремонта, реконструкции по показателям радиационной безопасности. Методические указания. Утверждены Главным государственным санитарным врачом Российской Федерации 28.01.2011 г., отменены с введением в действие МР 2.6.1.0333-23.
5. МР 2.6.1.0333-23. Радиационный контроль и санитарно-эпидемиологическая оценка жилых, общественных и производственных зданий и сооружений по показателям радиационной безопасности. Методические рекомендации. Утверждены руководителем Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека Главным государственным санитарным врачом Российской Федерации 01.12.2023.
6. Изгагин В.С., Жуковский М.В., Онищенко А.Д. Метод измерения среднегодовой ЭРОА торона в современных жилых зданиях // АНРИ. 2023. № 2(113). С. 34-49. DOI: 10.37414/2075-1338-2023-113-2-34-49.
7. Цапалов А.А., Киселев С.М., Ковлер К.Л., Микляев П.С., Петрова Т.Б., Жуковский М.В., Ярмошенко И.В., Маренный А.М., Тутельян О.Е., Кувшинников С.И. Стандартизация контроля радона в зданиях на основе рационального критерия оценки соответствия // Радиационная гигиена. 2023. Т. 16, № 4. С. 84-104. DOI: 10.21514/1998-426X-2023-16-4-84-104.
8. Письмо из управления метрологии, государственного контроля и надзора Росстандарта № 17867-ЗО/05 от 29.11.2024 по вопросу применения методик (методов) измерений. URL: <https://disk.yandex.ru/i/SztemPbuDSMJXw> (дата обращения: 23.12.2024).
9. Кононенко Д.В., Кормановская Т.А., Васильев А.С., Сапрыкин К.А. Новые методические рекомендации по радиационному контролю и санитарно-эпидемиологической оценке жилых, общественных и производственных зданий и сооружений по показателям радиационной безопасности. Часть 1 // Радиационная гигиена. 2024. Т. 17, № 2. С. 138-147. DOI: 10.21514/1998-426X-2024-17-2-138-147.

10. Васильев А.С., Романович И.К., Кононенко Д.В., Кормановская Т.А., Сапрыкин К.А., Балабина Т.А. Обоснование методических подходов к контролю содержания радона в воздухе помещений эксплуатируемых общественных зданий с некруглосуточным пребыванием людей // Радиационная гигиена. 2021. Т. 14, № 3. С. 29-40. DOI: 10.21514/1998-426X-2021-14-3-29-40.
11. МУ 2.6.1.715-98. Проведение радиационно-гигиенического обследования жилых и общественных зданий. Методические указания. Утверждены Главным государственным санитарным врачом Российской Федерации 24.08.1998 г., отменены с 28.02.2011 г. с введением в действие МУ 2.6.1.2838-11.
12. Цапалов А.А., Киселев С.М., Маренный А.М., Ковлер К.Л., Кувшинников С.И., Янкин А.С. Неопределенность результатов контроля радона в помещениях. Часть 2. Экспериментальная оценка неопределенности временных вариаций радона // Радиационная гигиена. 2018. Т.11, № 1. С. 64-79. DOI: 10.21514/1998-426X-2018-11-1-64-79.
13. A. Tsapalov, K. Kovler, «Temporal uncertainty versus coefficient of variation for rational regulation of indoor radon», *Indoor Air*, no. 32(9):e13098, 2022. DOI: 10.1111/ina.13098.
14. A. Tsapalov, K. Kovler, «Studying temporal variations of indoor radon as a vital step towards rational and harmonized international regulation», *Environmental Challenges*, no. 4, pp. 1002-2021. DOI: 10.1016/j.envc.2021.100204.
15. Цапалов А.А., Ермилов А.П., Гулябянц Л.А., Губин А.Т., Кувшинников С.И. Принцип оценки среднегодовой ЭРОА радона в зданиях по результатам краткосрочных измерений // Радиационная гигиена. 2010. Т. 3, № 3. С. 23-27.
16. Васильев А.С., Романович И.К., Кормановская Т.А., Кононенко Д.В., Историк О.А., Еремина Л.А. Сравнительная оценка доз облучения и радиационных рисков у обучающихся и сотрудников некоторых детских учреждений Ленинградской области в зависимости от методов и подходов к измерению содержания радона в воздухе помещений // Радиационная гигиена. 2022. Т. 15, № 2. С. 6-18. DOI: 10.21514/1998-426X-2022-15-2-6-18.
17. Sources and Effects of Ionizing Radiation. UNSCEAR 2000 Report to the General Assembly, with Scientific Annexes. Vol. I: Sources. Annex B: Exposures from natural radiation sources. New York: United Nations, 2000. 76 p.
18. Радиация в школе в ЕАО – из-за превышения опасного радона закрыт спортзал // Информационное агентство ЕАОmedia: сетевое изд. 2018. 15 ноя. URL: <https://eaomedia.ru/news/759984/> (дата обращения: 24.11.2022).
19. ICRP Publication 126. Radiological Protection against Radon Exposure. Ann. ICRP, vol. 43, no. 3, 2014. Труды МКРЗ. Радиологическая защита от облучения радоном. Перевод публикации 126. МКРЗ. М.: изд-во «ФГБУ ГНЦ ФМБЦ им. А.И. Бурназяна ФМБА России», 2015, 88 с. ISBN 978-5-9035926-06-8.
20. Стамат И.П., Кормановская Т.А., Горский Г.А., Еремин А.В. К обоснованию требований к контролю показателей радиационной безопасности зданий и сооружений при сдаче их в эксплуатацию // Радиационная гигиена. 2009. Т. 2, № 4. С. 10-15.
21. Васильев А.С. Облучение обучающихся и сотрудников детских учреждений Ленинградской области природными источниками излучения. Часть 1: Результаты комплексного радиационного обследования // Радиационная гигиена. 2023. Т. 16, № 2. С. 65-77. DOI: 10.21514/1998-426X-2023-16-2-65-77.
22. Цапалов А.А., Киселев С.М., Маренный А.М., Ковлер К.Л., Кувшинников С.И. Неопределенность результатов контроля радона в помещениях. Часть 1. Проблема оценки содержания радона и современный принцип контроля // Радиационная гигиена. 2018. Т. 11, № 1. С. 64-79. DOI: 10.21514/1998-426X-2018-11-1-64-79.

Radon Regulation Crisis in Russia: the Problem of Indoor Testing and an Alternative Method. Part 2

Andrey Tsapalov¹, Petr Miklyaev¹, Tatiana Petrova³, Sergey Kuvshinnikov⁴

¹ Scientific Production Company «Doza», Ltd, Zelenograd, Moscow, Russia

² Sergeev Institute of Environmental Geoscience Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

³ Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

⁴ Federal Center of Hygiene and Epidemiology, Federal Service for Surveillance on Consumer rights Protection and Human Well-Being, Moscow, Russia

Abstract. The first part of the article is devoted to a discussion with the responsible regulator about the crisis in radon risk regulation on four actual issues. Instead of constructive discussion and problem solving, the regulator denies the existence of the crisis. The second part of the article discusses in more detail the situation and solution of the most important problem of indoor radon measurements for conformity assessment of tested rooms (buildings) with radiation safety requirements. The discussion is divided into six parts: (i) the issue of cancellation of indoor thoron EEC restriction, (ii) the issue of transition from EEC of radon isotopes to radon concentration in reference level, (iii) non-compliance with metrology requirements in MR 2.6.1.0333-23, (iv) the issue of reliability of indoor testing in MR 2.6.1.0333-23, (v) the problem of justification of decisions by the regulator, (vi) an alternative method of indoor radon tasting based on rational principle of measurements.

Keywords: radon, thoron, EEC, indoor, buildings, regulation, reference level, radiation control, conformity assessment, measurements, metrology, uncertainty, reliability.

А.А.Цапалов¹ (к.т.н., с.н.с.), П.С.Микляев² (д.геол.-мин.н., профессор РАН, зам.директора), Т.Б.Петрова³ (к.т.н., с.н.с.), С.И.Кувшинников⁴ (эксперт-физик)

¹ Научно-производственное предприятие «Доза», г. Зеленоград

² Институт геоэкологии им. Е.М.Сергеева РАН, г. Москва

³ Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова», г. Москва

⁴ Федеральный центр гигиены и эпидемиологии, Федеральная служба по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, г. Москва

Контакты: тел. +7 (910) 451-7305; e-mail: andrey-ants@yandex.ru

**Оценка соответствия помещений зданий требованиям
Норм радиационной безопасности по ограничению
содержания радона в воздухе
Методика радиационного контроля (проект)**



Рис.1. Структура Методики.

1. Область применения

1.1. Настоящий документ распространяется на организацию, порядок проведения измерений и оценку соответствия требованиям норм радиационной безопасности по части ограничения содержания радона в воздухе помещений эксплуатируемых или вводимых в эксплуатацию после завершения строительства, реконструкции или капитального ремонта зданий, включая оценку соответствия после завершения мероприятий по защите зданий от радона.

1.2. Настоящий документ предназначен для оценки соответствия зданий жилого, общественного и производственного назначения, которая может проводиться индивидуальными предпринимателями и юридическими лицами, деятельность которых связана с радиационным контролем, а также проектированием, строительством (капитальным ремонтом или реконструкцией) и эксплуатацией зданий, включая мероприятия по защите зданий от радона.

1.3. Настоящим документом могут руководствоваться организации (структурные подразделения) федеральных органов исполнительной власти, осуществляющие федеральный государственный санитарно-эпидемиологический надзор за обеспечением радиационной безопасности населения при облучении природными источниками излучения.

1.4. Настоящий документ может также применяться жильцами, владельцами зданий, риэлторами и любыми другими заинтересованными лицами для самостоятельной оценки соответствия помещений зданий требованиям норм радиационной безопасности по части ограничения содержания радона в воздухе.

2. Нормативные ссылки

В настоящем документе использованы ссылки на следующие нормативные документы:

1. СанПиН 2.6.1.2523-09. Нормы радиационной безопасности (НРБ-99/2009).
2. СП 2.6.1.2612-10. Основные санитарные правила обеспечения радиационной безопасности (ОСПОРБ-99/2010).
3. СанПиН 1.2.3685-21. Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания.
4. ГОСТ Р 8.563–2009. Государственная система обеспечения единства измерений. Методики (методы) измерений.
5. ГОСТ 8.638–2013. Государственная система обеспечения единства измерений. Метрологическое обеспечение радиационного контроля. Основные положения.
6. ГОСТ 34100.3–2017. Неопределенность измерения. Часть 3. Руководство по выражению неопределенности измерения.
7. ГОСТ ISO/IEC 17025–2019. Общие требования к компетентности испытательных и калибровочных лабораторий.
8. ГОСТ Р 58973–2020. Оценка соответствия. Правила к оформлению протоколов испытаний.

Примечание: содержание настоящего документа является универсальным в отношении требований норм радиационной безопасности по части ограничения содержания радона в воздухе помещений зданий, учитывая вероятное усовершенствование (соответствующие изменения) НРБ и ОСПОРБ по мере их эволюции.

3. Термины и определения

В настоящем документе применены следующие термины с соответствующими им определениями:

- **здание** – результат строительства, представляющий собой объемное надземное строительное сооружение, включающее в себя помещения, предназначенные для проживания и (или) деятельности людей, размещения производства, хранения продукции или содержания животных, а также сети и системы инженерно-технического обеспечения;
- **помещение** – часть пространства внутри здания, имеющая определенное функциональное назначение и огражденное со всех сторон строительными конструкциями: стенами (с окнами и дверями), перекрытием и полом;

- **ОА радона** – объемная активность (концентрация) радона ($\text{Бк}/\text{м}^3$), выражает количество распадов ядер Rn-222 в секунду (Бк) в одном кубическом метре воздуха;
- **ЭРОА радона** – эквивалентная равновесная объемная активность радона ($\text{Бк}/\text{м}^3$) выражает взвешенную сумму объемных активностей короткоживущих продуктов распада Rn-222 (Po-218 , Pb-214 и Bi-214) и равна такому значению ОА радона в воздухе, при котором равновесная смесь его короткоживущих продуктов распада выделяет такую же энергию, как и реальная неравновесная смесь [1]; в помещениях зданий связь между ОА и ЭРОА радона выражается через фактор равновесия (F) соотношением $\text{ЭРОА}/\text{ОА} = 0,5$ (в международном регулировании радона $F = 0,4$); в пунктах 4.2, 5.3.2 и 5.3.3 НРБ-99/2009 норматив выражен в единицах ЭРОА изотопов радона, что эквивалентно вдвое большему значению в единицах ОА радона (без учета вклада менее распространенного изотопа Rn-220 [2]), например, $100 \text{ Бк}/\text{м}^3$ ЭРОА радона эквивалентно $200 \text{ Бк}/\text{м}^3$ ОА радона;
- **долгосрочное измерение** – непрерывное измерение (включая регистрацию данных через каждые несколько часов), либо пробоотбор (экспозиция) с последующим анализом, если продолжительность измерения (пробоотбора) от 2 до 12 месяцев;
- **краткосрочное измерение** – непрерывное измерение (включая регистрацию данных через каждые несколько часов), либо пробоотбор (экспозиция) с последующим анализом, если продолжительность измерения (пробоотбора) от 2 до 7 суток; измерения/пробоотбор продолжительностью от нескольких недель до двух месяцев тоже допускаются, однако такой интервал не вызывает особого внимания и необходимости применения специальной терминологии;
- **экспрессное измерение** – измерение, либо пробоотбор с последующим анализом при продолжительности измерения (пробоотбора) от нескольких минут до нескольких часов (не допускается настоящей методикой);
- **тест** – процедура контроля, включающая проведение краткосрочного или долгосрочного измерения, а также сбор/анализ данных и оценку соответствия помещения требованиям норм радиационной безопасности;
- **естественная вентиляция** – организованный или неорганизованный процесс удаления воздуха из помещения и замена его наружным воздухом за счет сил гравитации (более теплый воздух поднимается вверх), а также инсоляционного и ветрового напоров;
- **принудительная вентиляция** – организованный процесс (система) удаления воздуха из помещения и замена его наружным воздухом за счет разницы давления внутри помещения и снаружи здания, создаваемой непрерывной работой одного или нескольких вентиляторов;
- **нормальный режим вентиляции** – характерен для режима обычной эксплуатации здания, когда все помещения и здание в целом, включая естественную или принудительную вентиляцию, а также другие инженерные системы, эксплуатируются в штатном режиме без каких-либо ограничений; частота проветривания зависит от предпочтения обитателей (жителей или работников) помещений зданий;
- **ограниченный режим вентиляции** – характерен в тех случаях, когда квартира (включающая несколько помещений) или здание в целом выдерживаются при постоянно закрытых окнах и дверях, а также отключена принудительная вентиляция (если предусмотрена проектом); данный режим вентиляции имеет место в новых незаселенных зданиях, либо в эксплуатируемых зданиях, например, в период выходных, когда производственные процессы приостановлены и отсутствуют люди;
- **временная неопределенность** – компонент суммарной неопределенности оценки соответствия, который определяется как значение 95-го перцентиля (или 95% вероятности охвата) в распределении всех отклонений (D) между измеренными концентрациями $C_{ij}(t)$ и измеренной среднегодовой (СГ) концентрацией радона: $D_{ij}(t) = [C_j^{СГ}/C_{ij}(t)] - 1$ ($i = 1 \dots M$; $j = 1 \dots N$), в репрезентативной выборке из N помещений (зданий); в каждом из N помещений (зданий) проводятся непрерывные измерения ОА радона в течение одного года с периодом регистрации 1 или 3 часа [2] (при $M = 8760$ или 2920 , соответственно), что обеспечивает хорошую статистику отклонений $D_{ij}(t)$ для любой продолжительности измерения t (Приложение А);

- **инструментальная неопределенность** – компонент суммарной неопределенности оценки соответствия, который учитывает все источники неопределенности (в основном случайную/статистическую и систематическую/калибровочную компоненты), связанные с измеренной ОА (или ЭРОА) радона, независимо от природы происхождения радона и его поведения во времени и пространстве (Приложение Б);
- **коэффициент кратности** – используется в дополнительном критерии для идентификации помещений с высоким содержанием радона и определяется как значение 95-го перцентиля (или 95% вероятности охвата) в распределении отношений (R) измеренных концентраций $C_{ij}(t)$ к измеренной среднегодовой (СГ) концентрации радона: $R_{ij}(t) = C_{ij}(t)/C_j^{CG}$ ($i = 1 \dots M$; $j = 1 \dots N$); массивы значений $C_{ij}(t)$ и C_j^{CG} те же самые, которые использовались для определения временной неопределенности [7];
- **ALARA** (As Low As Reasonably Achievable / настолько низко, насколько это разумно достижимо) – принцип, выражающий один из основных критериев радиационной защиты с целью минимизации вредного воздействия ионизирующей радиации, который предусматривает поддержание на возможно низком и достижимом уровне как индивидуальных, так и коллективных доз облучения с учетом социальных и экономических факторов.

4. Принцип измерений и оценки соответствия

4.1. Общие положения

4.1.1. В настоящем документе под термином «радон» подразумевается наиболее распространенный изотоп Rn-222 (период полураспада 3,8 суток), пространственно-временное поведение которого уже в достаточной мере изучено в зданиях. Дополнительный вклад в радиационный риск за счет менее распространенного изотопа Rn-220 (период полураспада 55 секунд), называемого «тороном», является незначительным по сравнению с радоном [3]. Более того, в течение нескольких десятилетий санитарно-эпидемиологического надзора за обеспечением радиационной безопасности населения РФ не было сообщений (публикаций) о значимых индивидуальных рисках из-за повышенных уровней ЭРОА торона в зданиях [3], в отличие от множества публикаций о высоких ОА и ЭРОА радона [2]. Кроме того, пространственно-временные закономерности поведения ОА и ЭРОА торона в зданиях до сих пор не изучены. По этим причинам принцип измерений и оценки соответствия распространяется только на изотоп Rn-222.

4.1.2. Высокие содержания радона в отдельных зданиях нередко обнаруживаются, в том числе, и в пределах территорий с низким средним уровнем радона в зданиях по региону. Этот факт закономерно связан с логнормальным характером распределения ОА радона в зданиях [4]. Поэтому контроль радона должен проводиться в каждом здании, а измерение – единственный способ для оценки соответствия помещения/здания требованиям норм радиационной безопасности.

4.1.3. Проведение массовых измерений радона с охватом каждого здания, независимо от уровня радона в регионе, способствует реализации главной цели регулирования радона, заключающейся в снижении как общего риска для всего населения, так и индивидуального риска наиболее облучаемых лиц. В обоих случаях реализация цели осуществляется через **управление зданиями**, а не индивидуальной экспозицией, и должна привести к снижению ОА радона в воздухе помещений до разумно достижимого значения – ниже национального или регионального ограничивающего уровня. Стратегия защиты от радона должна включать как предупредительные меры в новых зданиях, так и корректирующие (радонозащитные) мероприятия по снижению облучения в существующих зданиях [5].

В рамках реализации цели и стратегии регулирования радона Нормы радиационной безопасности (пункты 5.3.2 и 5.3.3 НРБ-99/2009), а также Основные санитарные правила обеспечения радиационной безопасности (пункты 5.2.1 и 5.2.2 ОСПОРБ-99/2010) устанавливают национальный уровень, ограничивающий **среднегодовое содержание радона в помещениях**.

4.1.4. Концентрация радона может существенно (кратно) изменяться в течение суток, недель и сезонов даже в постоянно закрытых помещениях и зданиях [2], поэтому наиболее надежное решение о соответствии (или несоответствии) тестируемого помещения требованиям Норм радиационной безопасности достигается

за счет измерения в течение одного года. В то же время в большинстве зданий содержание радона существенно ниже ограничивающего уровня, поэтому нерационально в каждом помещении определять среднегодовой уровень с высокой точностью за счет длительного измерения в течение года, однако сокращение времени теста, очевидно, приводит к снижению надежности оценки соответствия.

В этой связи суть рационального критерия оценки соответствия (выражение (1) п. 4.2.1) заключается в сравнении ограничивающего уровня с верхней границей доверительного интервала оцениваемого среднегодового значения, которое определяется на основе результата измерения концентрации радона с учетом возможности контроля основных компонентов (временной и инструментальной) неопределенности, снижающейся с увеличением продолжительности теста [2,6,7]. В подавляющем большинстве случаев из-за низкого содержания радона в зданиях достаточно лишь проведения недорогих краткосрочных тестов (от 2 до 7 суток) в рамках рационального критерия, чтобы убедиться в отсутствии радоновой проблемы. В другой, относительно небольшой доле случаев, потребуется дополнительное проведение более точных и дорогостоящих долгосрочных тестов (от 2 до 12 месяцев) после (или в продолжение) краткосрочных измерений из-за высокой временной неопределенности коротких тестов, а также повышенного и сверхнормативного содержания радона в некоторых зданиях, которые в итоге будут надежно идентифицированы.

Выраженный выше принцип измерения и оценки соответствия (1), благодаря контролю основных компонентов неопределенности, обеспечивает надежность решений с вероятностью не менее 95% независимо от применяемых методов и средств измерений как при долгосрочных, так и краткосрочных тестах, но исключая применение экспрессных измерений длительностью несколько минут или часов.

4.1.5. Результаты специальных исследований свидетельствуют о низкой надежности оценки соответствия на основе экспрессных измерений по причине неприемлемо высоких временных вариаций радона, и как следствие, чрезмерно высокой и неконтролируемой временной неопределенности [2,3]. Кроме того, практика экспрессных измерений не только не обеспечивает удовлетворительную надежность оценки соответствия тестируемых помещений требованиям Норм радиационной безопасности, но и совершенно не защищена от небрежности либо умышленного нарушения условий измерения [2,3]. В этой связи, а также учитывая международный опыт [2], продолжительность теста должна быть не менее 2 суток в условиях ограниченного режима вентиляции и не менее 4 суток в условиях нормального режима вентиляции.

4.1.6. В Приложении А приводятся значения временной неопределенности в зависимости от продолжительности измерений и режима вентиляции (нормального и ограниченного). Эти значения были получены путем статистического анализа массивов разностей (отклонений $Dij(t)$) между среднегодовыми и измеренными с разной продолжительностью значениями ОА радона в выборке зданий, расположенных на территориях с различным геологическим строением и климатическими условиями. Такой подход позволяет учесть совокупное влияние всех естественных (природных) и антропогенных факторов (включая режим вентиляции и температурное влияние) на поведение радона во времени в помещениях зданий [2,6,7].

Очевидно, что с увеличением продолжительности измерения временная неопределенность снижается и равна нулю, если продолжительность теста равна одному году.

В режиме ограниченной вентиляции, когда все окна и двери в здании постоянно закрыты, амплитуда колебаний ОА радона снижается, поэтому временная неопределенность примерно в полтора–два раза ниже по сравнению с режимом нормальной вентиляции, когда все помещения и здание в целом эксплуатируются в штатном (обычном) режиме без каких-либо ограничений.

В предыдущих методических указаниях (МУ 2.6.1.037–2015) критерий оценки соответствия включал отдельный учет температурного влияния для определенной группы помещений. Однако накапливающиеся результаты годовых и сезонных измерений ОА радона в зданиях показывают, что не существует строгой закономерности температурного (или сезонного) влияния, которую можно применять к любым помещениям и зданиям, хотя чаще встречаются сообщения (публикации) о более высоких уровнях радона в холодный период года [2].

4.1.7. В Приложении Б приводятся математические алгоритмы, а также указания и рекомендации по обеспечению качества измерений путем контроля инструментальной неопределенности.

Сопоставление вкладов временной и инструментальной компонент в общий бюджет неопределенности оцениваемого среднегодового уровня радона показывает, что при продолжительности теста менее двух месяцев вклад инструментальной компоненты незначительный, даже если инструментальная неопределенность составляет 40% [2,6,7]. В режиме долгосрочных измерений целесообразно применение более точных методов и средств измерений, обеспечивающих более низкую инструментальную неопределенность, которую, однако, нецелесообразно снижать менее 20% по причине существования межгодовых вариаций радона в зданиях [2,6,7].

Таким образом, метрологические требования по обеспечению качества в режиме краткосрочных измерений должны быть более мягкими по сравнению с требованиями к долгосрочным измерениям [2,6,7]. Это позволяет легализовать применение недорогих (непрофессиональных) средств измерений радона [2,6,7], а также участие самого населения в широкомасштабном тестировании помещений зданий.

4.1.8. Мотивация населения для самостоятельного тестирования жилищ и офисов за счет информирования о радоновых рисках, а также внедрения недорогих и удобных инструментов измерений в рамках рационального критерия оценки соответствия позволяет коммерциализировать индустрию регулирования радона для проведения массового тестирования зданий в масштабе всей страны. Однако при добровольном тестировании сложно добиться выполнения минимально необходимого объема измерений в каждом здании (п.5.4). Поэтому, если во всем здании проводится лишь 2–3 измерения (в разных помещениях одновременно), важно конкретизировать условия выбора помещений в порядке приоритета тестирования в зависимости от типа и расположения помещений.

Высоким является приоритет тестирования помещений с длительным пребыванием типа спальни, детской игровой комнаты, рабочего кабинета и других помещений, в которых люди обычно проводят не менее 6 часов в сутки. Если помещения находятся на разных этажах, то внимание фокусируется на помещениях указанного типа, которые расположены на нижних этажах, вплоть до подвалов, хотя в подвалах люди обычно не живут и не проводят много времени.

Низким является приоритет тестирования помещений, в которых люди проводят мало времени и, тем более, редко посещаются, независимо от уровня (этажа) их расположения.

Обычно в помещениях подвалов и цокольных этажей содержание радона выше, поскольку грунт является основным источником или поставщиком радона внутрь зданий (дополнительным менее значимым источником являются каменные строительные материалы типа бетонных плит, кирпича и т. п., а также в редких случаях – источники водоснабжения). Однако при ограниченном количестве измерений тестирование помещений в подвале или на цокольном этаже нецелесообразно, если эти помещения редко посещаются.

4.1.9. Реконструкция или капитальный ремонт здания, включая модернизацию инженерных систем и подземных коммуникаций, могут повлиять на радоновую обстановку в здании, особенно на нижних этажах. В этом случае целесообразно повторное обследование здания. Также вследствие постепенной деградации элементов конструкции фундамента и инженерных систем подземной части здания может усилиться миграция радона из грунта внутрь здания, поэтому через каждые 3–5 и 10 лет рекомендуется проводить повторные радоновые тесты не только в районах с высоким, но и с низким содержанием радона в зданиях, соответственно.

4.1.10. Сбор и накопление результатов радоновых тестов, включая характеристики помещений и зданий, позволяют лучше оценивать коллективные риски за счет облучения радоном в разных регионах страны, а также более детально картировать потенциальную радоноопасность территорий в масштабе от регионов до муниципалитетов, при этом должна обеспечиваться конфиденциальность добровольных участников тестов.

4.2. Рациональный критерий оценки соответствия

4.2.1. Рациональный критерий обеспечивает надежность решения не менее 95% (или не более 5% решений «ложной приемки») о соответствии помещения требованиям Норм радиационной безопасности, если выполняется условие [2,6,7]:

$$C(t) \cdot \left[1 + \sqrt{U_V(t)^2 + U_H^2} \right] < C_{HY}^{OA} \quad (\text{либо } < 2 \cdot C_{HY}^{ЭРОА}), \quad (1)$$

где $C(t)$ – ОА радона (или ЭРОА радона, умноженная на 2) в Бк/м³, измеренная за период t , продолжительность которого должна быть не менее двух суток в режиме ограниченной вентиляции и не менее четырех суток в режиме нормальной вентиляции; C_{HY} – национальный или региональный уровень, ограничивающий среднегодовое содержание радона в помещении, выраженный в единицах ОА радона (либо в единицах ЭРОА изотопов радона, см. раздел 3) в Бк/м³; $U_V(t)$ – временная неопределенность в относительных единицах (при коэффициенте охвата $k = 2$), значения которой зависят от продолжительности измерения и режима вентиляции и приводятся в Приложении А; U_H – инструментальная неопределенность в относительных единицах (при $k = 2$), алгоритм определения которой приводится в Приложении Б.

4.2.2. Дополнительный критерий обеспечивает надежность решения не менее 95% о несоответствии помещения требованиям Норм радиационной безопасности, если выполняется условие [7]:

$$\frac{C(t)}{Kp(t)} \cdot (1 - U_H) > C_{HY}^{OA} \quad (\text{либо } > 2 \cdot C_{HY}^{ЭРОА}), \quad (2)$$

где $Kp(t)$ – коэффициент кратности в относительных единицах, значения которого зависят от продолжительности измерения (только в режиме нормальной вентиляции) и приводятся в Приложении А.

5. Условия измерений

5.1. Общие условия

5.1.1. Измерения в краткосрочном и долгосрочном режимах могут проводиться в любое время года, исключая начало измерений в краткосрочном режиме во время неблагоприятных погодных условий. В этом случае рекомендуется заранее учитывать данные прогноза метеорологических служб и не начинать краткосрочные измерения:

- при аномально высокой или низкой температуре в регионе;
- при высокой скорости и/или сильных порывах ветра;
- в период затяжных дождей и в течение 1–2 дней после их завершения.

5.1.2. Во всем здании, а не только в тестируемых помещениях, должны быть установлены все окна и двери, налажена работа системы естественной и/или принудительной вентиляции (если предусмотрена проектом), а также систем отопления, водоснабжения и канализации. Обследования новых или реконструируемых зданий рекомендуется проводить не ранее чем через одну неделю после завершения отделочных работ. Если новое здание сдается в эксплуатацию без внутренней отделки помещений, допускается отсутствие межкомнатных дверей.

5.1.3. В отопительный период года здания, либо отдельные квартиры с индивидуальной системой отопления, должны обследоваться только при включенном отоплении, которое должно функционировать не менее одной недели до начала измерений.

5.1.4. В помещениях должны соблюдаться микроклиматические условия в соответствии с требованиями СанПиН 1.2.3685-21, также учитывая температурно-влажностные ограничения рабочих диапазонов применяемых методов и средств измерений радона. В частности, температура и относительная влажность воздуха в помещениях не должны выходить за пределы соответствующих диапазонов для производственных (или жилых и общественных) зданий:

- от +13 до +28 (или от +18 до +26) °С,
- от 15 до 75 (или от 30 до 60) %.

5.1.5. В период выполнения измерений (пробоотбора) недопустимо проведение в тестируемом помещении, как и во всем здании, ремонтных работ, которые могут влиять на воздушно-тепловой режим, особенно вентиляцию помещений.

5.1.6. В случае проникновения грунтовых вод в подвальные помещения обследование здания или отдельных помещений не проводится.

5.2. Вентиляционный режим

5.2.1. При ограниченной вентиляции, когда все окна и двери в здании (или тестируемой квартире) постоянно закрыты, а также отключена принудительная вентиляция (если предусмотрена проектом), продолжительность теста должна составлять не менее 2 суток. Если планируемая продолжительность теста в условиях ограниченной вентиляции не более 4 суток, необходима предварительная выдержка всего здания или тестируемой квартиры в течение не менее 12 часов, тоже при ограниченной вентиляции. Если планируемая продолжительность измерений при ограниченной вентиляции более 4 суток, то предварительных процедур для подготовки тестируемых помещений, как и здания в целом не требуется.

5.2.2. В режиме нормальной (обычной) вентиляции, когда все помещения и здание в целом эксплуатируются в штатном (обычном) режиме без каких-либо ограничений, продолжительность теста должна составлять не менее 4 суток. В этом случае никаких предварительных процедур для подготовки тестируемых помещений и здания не требуется.

Важно обратить внимание, что в режиме нормальной (обычной) вентиляции намеренно постоянно открытые, либо намеренно постоянно закрытые окна и двери, а также намеренное отключение принудительной вентиляции (работа которой предусмотрена проектом) могут существенно повлиять на результат измерений и, соответственно, снизить надежность тестирования помещений и здания, особенно в условиях краткосрочного теста.

5.2.3. Тестирование помещений в режиме нормальной (обычной) вентиляции является более предпочтительным по сравнению с тестированием в режиме ограниченной вентиляции [2,7].

5.3. Расположение места измерения в помещении

5.3.1. Место измерения должно располагаться вдали от оконного проема, двери и источников тепла, холода, влаги или сквозняков, не ближе 20 см от стен, а также должно быть защищено от попадания прямых солнечных лучей, влияния вибрации и электромагнитных полей, например, создаваемых печью СВЧ или мобильным телефоном (расстояние до этих устройств должно быть не менее 0,5 м).

5.3.2. Расположение места измерения должно исключать любые манипуляции со средством измерения (пробоотбора), включая перемещение, в течение всего периода теста.

5.3.3. Рекомендуемая высота места измерения от 0,4 до 2 м. В условиях ограниченной вентиляции и отсутствия мебели допускается измерение на полу с подложкой из картонного листа, размеры которого не менее 20×20 см.

5.3.4. В помещениях с большой площадью количество мест измерений должно определяться из расчета 1 место на 100 м², а в случае складских помещений большой площади – 1 место на 200–400 м².

5.4. Выбор тестируемых помещений в здании

5.4.1. Идеальный вариант тестирования охватывает все помещения в здании, однако это нерациональный подход, поскольку в большинстве зданий низкое содержание радона, тем более, на верхних этажах. Поэтому рационально начинать обследование здания при минимально необходимом охвате тестируемых помещений, в основном расположенных на первом этаже, учитывая приоритет тестирования в соответствии с п.4.1.8.

5.4.2. На первом этаже тестирование следует проводить во всех помещениях с длительным пребыванием людей. В случае многоквартирных зданий, сдаваемых в эксплуатацию без внутренней отделки (и межкомнатных дверей), минимальное количество измерений на первом этаже определяется из расчета 1 измерение на каждые 30–60 м², но не менее 1 измерения на квартиру (апартаменты).

5.4.3. На втором и самом верхнем этажах рекомендуется выполнять не менее чем по 2 теста. В этом случае тестируемые помещения должны находиться в разных квартирах, которые ближе всего расположены к лестничному пролету. Между этими этажами рекомендуется проводить тесты в случайно выбранных помещениях (разных квартирах), количество которых определяется из расчета 2 тестируемых помещения на каждые 5–10 этажей.

5.4.4. Способ выбора тестируемых помещений, согласно пп. 5.4.2 и 5.4.3, касается каждого отдельного подъезда обследуемого здания.

5.4.5. Если средств измерений недостаточно для минимально необходимого охвата тестируемых помещений, тогда обследование здания проводится этапами в разное время, охватывая один или несколько подъездов за этап.

5.4.6. В случае необходимости выявления зон наиболее интенсивного переноса радона из грунта внутрь здания необходимо одновременно проводить измерения (не менее 4 суток) во всех подвальных или цокольных помещениях, а также во всех помещениях на первом этаже при постоянно закрытых дверях и окнах.

5.4.7. Для проверки эффективности мер по защите здания от радона необходимо одновременно проводить измерения (не менее 4 суток) в том же режиме вентиляции и в тех же помещениях, в которых были обнаружены повышенные содержания радона до реализации защитных мероприятий.

5.5. Требования к средствам измерений

5.5.1. Для измерений ОА радона могут использоваться любые методы пробоотбора и средства измерений ОА (или ЭРОА) радона, обеспечивающие непрерывный или периодический пробоотбор и/или измерения в краткосрочном или долгосрочном режимах, и позволяющие при оценке средней ОА радона за период измерения t (от двух суток до одного года) учитывать значение инструментальной неопределенности $U_{и}$, также ориентируясь на алгоритмы в Приложении Б.

5.5.2. Рационально применять методы и средства измерений с погрешностью калибровки (или погрешностью измерений, если данные калибровки отсутствуют), не выходящей за пределы $\pm 40\%$ (при $k = 2$) и $\pm(20-30)\%$ (при $k = 2$) в краткосрочном и долгосрочном режимах измерений, соответственно (см. Приложение Б).

5.5.3. Для измерений температуры и относительной влажности воздуха в помещениях могут использоваться любые электронные устройства, в спецификации которых диапазоны измерений соответствуют требованиям п.5.1.4, а погрешность измерений температуры и влажности не хуже $\pm 1^\circ\text{C}$ и $\pm 3\%$, соответственно.

6. Проведение измерений

6.1. Подготовка к измерениям

6.1.1. При подготовке к измерениям рекомендуется выполнить сбор информации об обследуемом здании, включая план этажей и набор следующих данных:

- конкретное наименование здания (если приемлемо);
- расположение (точный адрес и/или координаты GPS);
- назначение (жилое/общественное/офисное/производственное);
- форма собственности (частная/долевая/муниципальная/государственная);
- состояние здания (эксплуатируемое/новое с отделкой/новое без отделки/реконструированное с отделкой/реконструированное без отделки);
- год (или декада) сдачи в эксплуатацию;
- количество этажей, включая цокольные и подземные;
- количество подъездов;

- основной строительный материал (каменный/деревянный/металл каркас/комбинированный);
- тип фундамента (плита/ленточный/свайный/комбинированный);
- наличие подвала (есть/нет);
- расположение входа в подвал (из здания/снаружи здания);
- тип вентиляции (естественная/принудительная);
- кондиционирование (центральное/индивидуальное/отсутствует);
- тип отопления (центральное/индивидуальное/отсутствует);
- тип водоснабжения (центральное/индивидуальное/отсутствует);
- тип канализации (центральная/индивидуальная/отсутствует);
- результаты предыдущего тестирования, а также сведения о защитных мероприятиях по снижению ОА радона, если проводились;
- состояние конструкций фундамента и перекрытий подвала/цоколя, а также состояние врезок подземных коммуникаций: водопровод, канализация, электрокабели (при наличии информации).

6.1.2. Рекомендуется заранее определить минимально необходимое количество тестируемых помещений и их расположение на основе информации о характеристиках здания, учитывая п.5.4 и имеющиеся средства измерений.

6.2. Выполнение измерений

6.2.1. Выполнение измерений (пробоотбора) в краткосрочном или долгосрочном режимах должно соответствовать руководству по эксплуатации средства измерения (пробоотбора).

6.2.2. Тестирование помещений рекомендуется начинать с измерений в краткосрочном режиме при соблюдении условий раздела 5 с регистрацией фактических погодных (темпер./влажность/ветер/осадки) и микроклиматических условий, а также режима вентиляции (нормальный или ограниченный).

6.2.3. В начале измерения (пробоотбора) по каждому помещению необходимо зарегистрировать следующие данные:

- неповторяющийся номер или шифр измерения (теста);
- дату и время (с точностью до одного часа);
- номер или шифр помещения, согласно плану этажей;
- состояние помещения (с отделкой и мебелью/с отделкой без мебели/без отделки);
- назначение помещения (спальня/детская/гостиная/офис/другое/неизвестно);
- этаж расположения;
- номер подъезда;
- тип (модель) пробоотборника и/или измерительного устройства;
- номер (шифр) пробоотборника и/или измерительного устройства.

6.2.4. При завершении измерения (пробоотбора) необходимо зарегистрировать дату и время (с точностью до одного часа), а также результат измерения, если возможно.

6.2.5. Экспонированные пробоотборники (в случае применения) должны быть оперативно доставлены в лабораторию для проведения анализа в соответствии с руководством по эксплуатации средства измерений.

6.3. Выражение результатов измерений

6.3.1. Результат каждого измерения должен включать следующий набор необходимых данных (независимо от применяемого средства измерений):

- неповторяющийся номер или шифр измерения (теста);
- дата и время начала теста (с точностью до часа);
- продолжительность теста с точностью до часа;
- средняя ОА радона (Бк/м³) за период измерения (теста);

- инструментальная неопределенность измерения ОА радона (U_H при $k = 2$), выраженная в относительных единицах (например, 0,25 или 25%);
- режим вентиляции (нормальный или ограниченный).

6.3.2. Набор дополнительных данных, связанных с результатом измерения и характеризующий условия теста, должен охватывать указанные выше характеристики здания (п.6.1.1) и помещения (п.6.2.3), включая данные о средстве измерения и микроклиматических условиях (п.5.1.4), которые регистрировались в начале теста. В случае краткосрочных измерений дополнительно указываются погодные условия в начале теста (температура/влажность/скорость ветра/количество осадков).

7. Оценка результатов измерений

7.1. Решения о соответствии помещения

7.1.1. Помещение соответствует требованиям Норм радиационной безопасности, если на основе результатов измерений, проведенных в соответствии с условиями раздела 5, выполняется критерий (1).

7.1.2. Помещение не соответствует требованиям Норм радиационной безопасности (требуются меры по снижению ОА радона), если на основе результатов измерений, проведенных в соответствии с условиями раздела 5, выполняется критерий (2), либо не выполняется критерий (1) при продолжительности теста не менее 9 месяцев.

7.1.3. Если критерий (1) не выполняется в режиме краткосрочных измерений (от 2 до 7 дней), то это может свидетельствовать о повышенном содержании радона в помещении, тогда рекомендуется:

- проведение более точных измерений в долгосрочном режиме (от 2 до 12 месяцев), что повышает вероятность выполнения критерия (1) вследствие снижения временной неопределенности, либо
- проведение мер по снижению ОА радона, следуя принципу ALARA.

7.2. Решения о соответствии здания

7.2.1. Здание соответствует требованиям Норм радиационной безопасности, если при минимально необходимом охвате тестируемых помещений каждое из них соответствует требованиям норм согласно п.7.1.1.

7.2.2. Здание не соответствует требованиям Норм радиационной безопасности (требуются меры по снижению ОА радона), если при минимально необходимом охвате тестируемых помещений хотя бы одно из них не соответствует требованиям норм согласно п.7.1.2.

7.3. Юридическая сила решения

7.3.1. В рамках добровольного тестирования помещений зданий (включая оплату услуг) юридический аспект решения о соответствии/несоответствии помещения, как и здания в целом, требованиям Норм радиационной безопасности не имеет особой важности. В то же время юридическая сила такого решения может иметь особую важность в случае проведения тестов и мероприятий по защите зданий от радона из средств регионального (местного) или федерального бюджета.

7.3.2. Решение о соответствии/несоответствии помещения, как и здания в целом требованиям Норм радиационной безопасности может иметь юридическую силу только в том случае, если измерения проводились квалифицированными специалистами аккредитованной лаборатории в рамках регламента настоящего документа с применением аттестованных средств измерений, согласно требованиям ГОСТ ISO/IEC 17025-2019.

7.3.3. В действующем свидетельстве об аттестации или поверке средства измерений должно приводиться либо предельное (максимальное) относительное значение инструментальной неопределенности (U_H при $k = 2$), которую метрологические службы в своих документах также могут называть «неопределенность измерения» или «погрешность измерения (со знаком \pm)», либо относительное значение компоненты инстру-

ментальной неопределенности ($U(\epsilon)$ при $k = 2$), выражающее пределы погрешности калибровки средства измерения, что необходимо для расчета значения U_I на основе алгоритмов в Приложении Б.

8. Обеспечение качества измерений

8.1. Качество измерений и надежность принятия решений о соответствии/несоответствии тестируемых помещений зданий требованиям Норм радиационной безопасности обеспечиваются за счет строгого выполнения регламента настоящего документа в совокупности контроля и управления такими основными компонентами неопределенности оценки соответствия, как временная $U_V(t)$ и инструментальная U_I неопределенности, включая коэффициент кратности $K_p(t)$, которые используются в критериях (1) и (2).

8.2. Детальная информация по контролю и управлению временной и инструментальной неопределенностями, включая коэффициент кратности, приводится в Приложениях А и Б.

9. Оформление результатов

9.1. Протокол испытаний (тестирования) должен быть оформлен в соответствии с требованиями ГОСТ Р 58973–2020 и включать ссылку на настоящий документ, а также содержать семь основных разделов, охватывающих информацию в соответствии с пунктами ниже.

9.1.1. Сведения о лаборатории, проводившей измерения, включая наименование и контакты, срок действия и номер аттестата аккредитации (если имеется), данные (или шифр) лица, ответственного за проведение теста, и другие данные, согласно ГОСТ Р 58973–2020. Если измерение (пробоотбор) проводилось добровольно частным лицом, тогда его данные указывать не обязательно.

9.1.2. Сведения о средстве измерения, включая модель, в том числе, пробоотборника (если применялся), их номера, срок действия и номер свидетельства об аттестации/поверке (если имеется), а также неопределенность или погрешность калибровки в относительных единицах при $k = 2$ (либо неопределенность измерения, либо погрешность измерения, если так указано в свидетельстве).

9.1.3. Сведения о здании, включая план этажей и список данных в соответствии с п. 6.1.1. Сюда же следует включать результаты предыдущего тестирования и защитных мер по снижению ОА радона, если проводились.

9.1.4. Условия измерений, включая режим вентиляции (нормальный или ограниченный), микроклиматические условия, согласно п.5.1.4, а также метеоданные в случае краткосрочных измерений.

9.1.5. Сведения о каждом обследованном помещении, включая соответствующие данные, согласно п.6.2.3, с отметкой на плане этажей, который должен прилагаться к протоколу испытаний, если тестирование здания охватывало минимально необходимое количество помещений согласно п. 5.4.

9.1.6. Результаты измерений по каждому обследованному помещению, включая номер или шифр измерения (теста), дату и время начала и окончания теста (с точностью до часа), продолжительность теста с точностью до часа, среднюю ОА радона ($\text{Бк}/\text{м}^3$) за период измерения (теста), а также инструментальную неопределенность измерения ОА радона (U_I при $k = 2$), выраженную в относительных единицах (например, 0,25 или 25%). Сюда же следует включать данные лабораторных измерений, если применялся пробоотборник с последующим лабораторным анализом.

9.1.7. Решение о соответствии или не соответствии каждого обследованного помещения требованиям Норм радиационной безопасности должно состоять из двух частей, включающих:

- Часть 1 – расчет значений левой части неравенств критериев (1) и (2), а также актуальное значение ограничивающего уровня (правая часть этих неравенств) в единицах ОА радона (в $\text{Бк}/\text{м}^3$);
- Часть 2 – вывод о соответствии или несоответствии помещения требованиям Норм радиационной безопасности на основе сравнения данных Части 1 согласно п.7.1.

9.2. Данные последних трех пунктов (9.1.5, 9.1.6 и 9.1.7) могут быть интегрированы в общую таблицу.

9.3. Если обследование здания проведено при минимально необходимом охвате тестируемых помещений, что позволяет выполнить оценку соответствия самого здания требованиям Норм радиационной безо-

пасности, тогда об этом сообщается в дополнительном восьмом разделе протокола испытаний со ссылкой на пп. 5.4 и 7.2. Соответственно, в восьмом разделе протокола должно приводиться решение о соответствии или не соответствии здания в целом требованиям норм радиационной безопасности, согласно п.7.2.

9.4. Если обследованные помещения, как и здание в целом, соответствуют требованиям норм радиационной безопасности, рекомендуется в завершение протокола испытаний добавлять напоминание, согласно п.4.1.9, о целесообразности проведения повторных тестов через каждые 3–5 и 10 лет в районах не только с высоким, но и низким содержанием радона в зданиях, соответственно.

Библиография

1. Маренный А.М., Цапалов А.А., Микляев П.С., Петрова Т.Б. Закономерности формирования радонового поля в геологической среде. М.: издательство «Перо» (ISBN 978-5-906883-94-0), 2016, 394 с.
2. Цапалов А.А., Киселев С.М., Ковлер К.Л., Микляев П.С., Петрова Т.Б., Жуковский М.В., Ярошенко И.В., Маренный А.М., Тютельян О.Е., Кувшинников С.И. Стандартизация контроля радона в зданиях на основе рационального критерия оценки соответствия. Радиационная гигиена. Т. 16, № 4. С. 84-104. 2023.
3. Цапалов А.А., Микляев П.С., Петрова Т.Б., Кувшинников С.И. Кризис регулирования радона в России: проблема тестирования зданий и альтернативный метод. Часть 2. АНРИ. 2025. № 1(120). С. 56-74.
4. ICRP. Protection against Radon-222 at home and at work. The international commission on radiological protection. 1993. ICRP publication 65. Annals of the ICRP. 1993. Vol. 23, no. 2, pp. 1-45. ISSN 0146-6453.
5. ICRP Publication 126. Radiological Protection against Radon Exposure. Ann. ICRP, vol. 43, no. 3, 2014. Труды МКРЗ. Радиологическая защита от облучения радоном. Перевод публикации 126. МКРЗ. М.: изд-во «ФГБУ ГНЦ ФМБЦ им. А.И. Бурназяна ФМБА России», 2015, 88 с. ISBN 978-5-9035926-06-8.
6. A. Tsapalov, K. Kovler, «Metrology for Indoor Radon Measurements and Requirements for Different Types of Devices», *Sensors*, no. 24(2), 504, 2024.
7. A. Tsapalov, K. Kovler, P. Bossew, «Strategy and Metrological Support for Indoor Radon Measurements Using Popular Low-Cost Active Monitors with High and Low Sensitivity» *Sensors*, no. 24(15), 4764, 2024.

Приложение А

Временная компонента неопределенности оценки соответствия

А1. Значения временной неопределенности $U_V(t)$ в зависимости от продолжительности измерения и режима вентиляции приводятся в относительных единицах (при $k = 2$) в табл. 1. В этой таблице также приводятся относительные значения коэффициента кратности $Kp(t)$ в зависимости от продолжительности измерения только в режиме нормальной вентиляции.

Таблица 1.

Продолжительность измерения*		Временная неопределенность $U_V(t)$ [2]		Коэффициент кратности $Kp(t)$ [7]
		Режим вентиляции		
		Нормальный	Ограниченный	
Сутки	2	-	1,05	-
	3	-	1,00	-
	4	1,25	0,95	1,74
	5	1,20	0,90	1,72
	6	1,20	0,80	1,70
	7	1,20	0,75	1,69
	8	1,20	0,70	1,68
	10	1,10	0,65	1,67
	12	1,10	0,60	1,66
	14	1,10	0,55	1,65
	20	1,10	0,50	1,61
Месяц	1	1,05	0,45	1,56
	2	1,00	0,40	1,48
	3	0,85	0,38	1,44
	4	0,65	0,36	1,42
	5	0,55	0,32	1,37
	6	0,45	0,26	1,31
	7	0,35	0,20	1,24
	8	0,25	0,16	1,20
	9	0,17	0,14	1,14
	10	0,10	0,09	1,09
	11	0,05	0,05	1,05
	12	0,00	0,00	1,00

* если продолжительность измерения находится между табличными значениями, тогда используются более высокие значения $U_V(t)$ и $Kp(t)$, например, $Kp(t = 4,8 \text{ суток}) = 1,74$.

А2. Снижение временной неопределенности $U_V(t)$, вероятно, может быть достигнуто на основе существенного увеличения массива статистических данных за счет накопления и обработки результатов непрерывных годовых измерений ОА радона (с периодом регистрации 1 или 3 часа) в нескольких сотнях зданий разного типа, равномерно распределенных на территории РФ [2]. В дополнение к этому, вероятно, может быть обнаружена статистически значимая корреляция между $U_V(t)$ и такими характеристиками, как, например, тип здания и этаж, что позволит ранжировать условия измерений, добиваясь еще большего снижения временной неопределенности.

А3. Массив статистических данных, используемый для оценки значений временной неопределенности, также используется для оценки значений коэффициента кратности $Kp(t)$ [7].

А4. Верифицированные (обновленные) значения временной неопределенности $U_V(t)$ и коэффициента кратности $Kp(t)$ могут быть приняты только после публикации научного обоснования, прошедшего рецензирование среди ведущих специалистов в области исследований пространственно-временного поведения радона в зданиях. Ввод в действие обновленных значений этих параметров осуществляется после метрологической экспертизы и аттестации обновленной МРК согласно ГОСТ 8.638-2013.

Приложение Б

Инструментальная компонента неопределенности оценки соответствия

Б1. Общие положения

Б1.1. Общее выражение инструментальной неопределенности U_H в относительных единицах имеет следующий вид [2,6,7]:

$$U_H = \sqrt{k^2 \cdot \frac{n/t + n_\phi/t_\phi}{(n - n_\phi)^2} + U^2(\varepsilon)}, \quad (\text{Б1})$$

где k – коэффициент охвата, равный 2; n – скорость счета импульсов (1/с), которые зарегистрированы за время измерения ОА(ЭРОА) или содержащей радон пробы, обозначаемое как t (с); n_ϕ – скорость счета импульсов (1/с), которые зарегистрированы за время измерения фона (согласно инструкции производителя средства измерения), обозначаемое как t_ϕ (с); $U(\varepsilon)$ – компонента инструментальной неопределенности в относительных единицах (при $k = 2$), выражающая пределы погрешности калибровки средства измерения и пробоотбора, также учитывающая влияние других значимых факторов (если $U(\varepsilon)$ равно 0,25 или 25%, тогда пределы относительной погрешности калибровки выражаются в виде $\pm 0,25$ или $\pm 25\%$).

Б1.2. Качество измерений достигается также путем контроля инструментальной неопределенности, управление которой, согласно (Б1), связано с анализом регистрируемой скорости счета импульсов (или их количества) за период измерения, а также компоненты $U(\varepsilon)$. Состав и значение этой компоненты зависят от методов измерений, среди которых можно выделить три наиболее популярных в международной (включая Россию) практике контроля радона в зданиях:

- 1) краткосрочный метод измерений ОА радона на основе пассивной сорбции радона активированным углем с последующим измерением его активности (угольный или квазиинтегральный метод);
- 2) долгосрочный метод измерений ОА радона на основе экспонирования трекового детектора типа CR-39 или LR-115 с последующим травлением и подсчетом треков (трековый или интегральный метод);
- 3) универсальный по длительности метод измерений ОА радона на основе естественной диффузии радона в измерительную камеру с непрерывной регистрацией накапливаемых импульсов, например, через каждые 1 или 3 часа (метод непрерывных измерений с применением разных принципов детектирования); к этому методу можно также причислить средства измерений ОА или ЭРОА радона с активным (принудительным) периодическим пробоотбором, включая соответствующую периодическую регистрацию результатов.

Далее по каждому из этих трех методов приводится более подробный алгоритм оценки инструментальной неопределенности, включая ее контроль.

Б2. Инструментальная неопределенность угольного метода

Б2.1. Выражение относительной инструментальной неопределенности угольного метода U_H вытекает из (Б1) и имеет следующий вид:

$$U_H = \sqrt{4 \cdot \frac{n/t + n_\phi/t_\phi}{(n - n_\phi)^2} + U_H^2(\varepsilon_1) + U_H^2(\varepsilon_2)}, \quad (\text{Б2})$$

где n – скорость счета импульсов (1/с), которые зарегистрированы за время (в секундах) измерения активности сорбированного радона в угле; n_{ϕ} – скорость счета импульсов (1/с), которые зарегистрированы за время (в секундах) измерения фона детектора с «чистым» углем; $U_{\Delta}(\varepsilon_1)$ – компонента инструментальной неопределенности в относительных единицах (при $k = 2$), выражающая пределы погрешности калибровки средства измерения (детектора), которая, например, для комплекса «КАМЕРА» не превышает 0,15 ($k = 2$); $U_{\Pi}(\varepsilon_2)$ – компонента инструментальной неопределенности в относительных единицах (при $k = 2$), выражающая пределы погрешности объемного эквивалента пробоотборника, которая, например, для комплекса «КАМЕРА» не превышает 0,25 ($k = 2$), либо 0,40 ($k = 2$), если не учитывается привес угля после пробоотбора.

Б2.2. Качество измерений угольным методом достигается за счет контроля инструментальной неопределенности, управление которой, согласно (Б2), связано с анализом регистрируемой скорости счета импульсов, а также компонент $U_{\Delta}(\varepsilon_1)$ и $U_{\Pi}(\varepsilon_2)$. Значения этих компонент неопределенности (или пределов погрешностей), а также соответствующие им значения чувствительности детектора ε_1 и объемного эквивалента пробоотборника ε_2 должны быть установлены в сертификате соответствия типу средства измерения (СИ). Соответствие $U_{\Delta}(\varepsilon_1)$ установленному значению должно подтверждаться при периодической поверке СИ, а компоненты $U_{\Pi}(\varepsilon_2)$ – по результатам испытаний при оформлении (или продлении) сертификата соответствия типу СИ, либо при изменении конструкции пробоотборника, а также использования новой партии или марки активированного угля.

Б3. Инструментальная неопределенность трекового метода

Б3.1. Выражение относительной инструментальной неопределенности трекового метода U_{II} вытекает из (Б1) и имеет следующий вид [6]:

$$U_{II} = \sqrt{4 \cdot \frac{N + N_0}{(N - N_0)^2} + U_K^2(\varepsilon)}, \quad (\text{Б3})$$

где N – количество треков после экспозиции детектора; N_0 – среднее количество фоновых треков среди неэкспонированных детекторов; $U_K(\varepsilon)$ – компонента инструментальной неопределенности в относительных единицах (при $k = 2$), выражающая пределы погрешности калибровки средства измерения (всего комплекса трекового метода), которая, например, для экспозиметра РЭИ-4 с пленочным детектором типа LR-115 не превышает 0,30 ($k = 2$) с учетом наиболее значимых факторов влияния, включая продолжительность экспозиции.

Б3.2. Качество измерений трековым методом достигается за счет контроля инструментальной неопределенности, управление которой, согласно (Б3), связано с анализом количества регистрируемых треков, а также компоненты $U_K(\varepsilon)$. Значение этой компоненты неопределенности (или пределов погрешности), а также соответствующее ей значение чувствительности трекового детектора ε и максимально допустимое количество фоновых треков N_0 должны быть установлены в сертификате соответствия типу средства измерения (СИ). Соответствие $U_K(\varepsilon)$ установленному значению должно подтверждаться при периодической поверке СИ, а параметра N_0 – по результатам испытаний каждой новой партии трековых детекторов.

Б4. Инструментальная неопределенность метода непрерывных измерений

Б4.1. Выражение относительной инструментальной неопределенности метода непрерывных измерений U_{II} вытекает из (Б1) и имеет следующий вид (при $n_{\phi} = 0$) [7]:

$$U_{II} = \sqrt{\frac{4}{C(t) \cdot \varepsilon \cdot t} + U_K^2(\varepsilon)}, \quad (\text{Б4})$$

где $C(t)$ – ОА радона в Бк/м³, измеренная монитором за период t (в часах), определяемая как отношение средней скорости счета импульсов к чувствительности монитора; ε – чувствительность или калибровоч-

ный фактор монитора радона, выражаемая через имп/час на 1 Бк/м^3 или $1/(\text{ч}\cdot\text{Бк/м}^3)$, определяется как отношение средней скорости счета импульсов монитора к средней ОА радона, измеренной образцовым монитором за период испытания монитора(ов); $U_K(\varepsilon)$ – компонента инструментальной неопределенности в относительных единицах (при $k = 2$), выражающая пределы погрешности калибровки средства измерения, которая, например, для мониторов радона типа RadonEye или RadonEye Plus2 (Южная Корея) и Corentium Home или Wave Radon (Норвегия) не превышает 0,30 ($k = 2$) при ε равном $0,84 \text{ 1/}(\text{ч}\cdot\text{Бк/м}^3)$ для корейских мониторов и $0,025 \text{ 1/}(\text{ч}\cdot\text{Бк/м}^3)$ для норвежских мониторов [7].

Б4.2. Качество измерений достигается путем контроля инструментальной неопределенности, управление которой, согласно (Б4), связано с анализом параметра ε с учетом $C(t)$ и t (либо регистрируемой скорости счета импульсов), а также компоненты $U_K(\varepsilon)$. Значение этой компоненты неопределенности (или пределов погрешности), а также соответствующее ей значение чувствительности ε должны быть установлены в сертификате соответствия типу средства измерения (СИ). Соответствие $U_K(\varepsilon)$ установленному значению должно подтверждаться при периодической поверке СИ.

Б4.3. В отличие от СИ на основе угольного и трекового методов, разнообразные типы мониторов ОА радона выпускаются большим количеством производителей (в основном, за рубежом). Однако до сих пор отсутствуют четкие метрологические требования как в международной, так и отечественной практике регулирования по части стандартизации, которые должны обеспечивать единство измерений ОА радона с целью оценки соответствия помещений зданий требованиям Норм радоновой безопасности [3,6,7]. Поэтому ниже приводятся рекомендации регулирующим органам и метрологическим службам, а также пользователям и производителям мониторов радона с целью их максимально эффективного применения в рамках рационального критерия оценки соответствия.

Б4.3.1. Калибровка мониторов радона и оценка ее неопределенности

Б4.3.1.1. Неопределенность $U_K(\varepsilon)$ в основном зависит от колебаний влажности, температуры, концентрации пыли и аэрозольного состава воздуха, а также ОА радона, изменение которой в широком диапазоне может нарушать линейность калибровки мониторов. Кроме этого, больший или меньший вклад вносят вариации характеристик самого детектора как электронного устройства, тем более, с учетом вариаций характеристик сцинтилляционных материалов, если применяются.

Вариации концентрации пыли и аэрозольного состава воздуха в условиях нормальной эксплуатации помещений зданий обычно не оказывают значимого влияния на чувствительность мониторов в течение 3–5 лет службы. Кроме того, важно учитывать, что основные целевые (нормативные, референтные и другие контрольные) уровни ОА радона в любых зданиях и сооружениях не превышают 1000 Бк/м^3 . Поэтому значение 1000 Бк/м^3 или, по крайней мере, значение 3000 Бк/м^3 целесообразно принимать в качестве верхней границы диапазона измерений ОА радона, в интервале которого гарантируется соответствие установленным значениям ε и $U_K(\varepsilon)$ согласно Б4.3.4. К тому же точность измерений достаточно высокой ОА радона, превышающей 1000 Бк/м^3 , практически не влияет на надежность оценки соответствия с использованием критериев (1) и (2).

Б4.3.1.2. Учитывая соображения выше, допускается (даже предпочтительно) проводить испытания мониторов, помимо традиционно применяемых метрологическими службами боксов со стабильной или плавно изменяющейся ОА радона, в естественной или регулируемой (как в боксах) воздушной среде помещений (объемом не менее 15 м^3) с характерными временными (суточными) вариациями ОА радона, не выходящими за пределы диапазона от 10 до $1000\text{--}3000 \text{ Бк/м}^3$ (ориентировочно), а также средней ОА радона за время испытания в диапазоне от 50 до $500\text{--}800 \text{ Бк/м}^3$ (ориентировочно).

Б4.3.1.3. Следует учитывать, что чем ниже средняя ОА радона, тем больше должна быть продолжительность испытания t (в часах), которая определяется вытекающим из (Б4) выражением следующего вида (при $U_K(\varepsilon) = 0$) [7]:

$$t = \frac{4}{C(t) \cdot \varepsilon \cdot U_{Cm}^2}, \quad (\text{Б4.1})$$

где U_{Cm} – статистическая компонента неопределенности $U_{И}$, выраженная в относительных единицах при $k = 2$.

Продолжительность испытания должна обеспечивать минимизацию вклада статистической компоненты U_{Cm} , значение которой как для испытуемых, так и образцового монитора, не должно превышать 0,05 при оценке t по формуле (Б4.1), выбирая большее значение t при одновременных (параллельных) измерениях с мониторами разного типа.

Б4.3.1.4. Значение $U_K(\varepsilon)$ для испытуемых мониторов одного типа определяется (при $k = 2$) без учета малого вклада компоненты U_{Cm} (менее 5%) на основе выражения, которое включает две другие компоненты неопределенности, а именно, стандартное отклонение и погрешность смещения ε [7]:

$$U_K(\varepsilon) = 2 \cdot \sqrt{\frac{\sum(C_i - C_{cp})^2}{C_{cp}^2 \cdot (m-1)} + (C_{cp}/C_{обр} - 1)^2}, \quad (\text{Б4.2})$$

где C_i – ОА радона, измеренная на i -м мониторе за период испытания; m – количество испытуемых мониторов одного типа (см. Б4.3.1.6); C_{cp} – средняя ОА радона по всем m мониторам; $C_{обр}$ – ОА радона, измеренная параллельно с помощью образцового монитора, который должен иметь действующий аттестат или свидетельство о поверке с установленными значениями ε и $U_K(\varepsilon)$ при $k = 2$ (если $k = 1$, то принимается удвоенное значение неопределенности калибровки); если данные о неопределенности калибровки образцового монитора отсутствуют, тогда используется значение параметра, называемого «неопределенность измерения» или «погрешность измерения».

Если результат оценки по формуле (Б4.2) оказывается меньше неопределенности калибровки образцового монитора $U_{обр}$ ($k = 2$), тогда значение $U_K(\varepsilon)$ принимается равным $U_{обр}$ для испытуемых мониторов [7].

Б4.3.1.5. В случае значимого вклада погрешности смещения (последнее слагаемое под корнем в уравнении (Б4.2)) значение $U_K(\varepsilon)$ поддается снижению путем уточнения (корректировки) калибровочного фактора ε , используя выражение:

$$\varepsilon = \varepsilon_{нач} \cdot (C_{cp}/C_{обр}), \quad (\text{Б4.3})$$

где $\varepsilon_{нач}$ – начальное значение калибровочного фактора.

После установки на всех испытуемых мониторах уточненного значения ε испытания для оценки $U_K(\varepsilon)$ проводятся снова, согласно Б4.3.1.4.

Б4.3.1.6. Если испытаниям в соответствии с пунктами Б4.3.1.4 и Б4.3.1.5 подвергались не менее 20 мониторов одного типа [7], то значения ε и $U_K(\varepsilon)$ могут применяться в дальнейшем при производстве новых мониторов того же типа (или иного типа, но с таким же детектором и конструкцией измерительной камеры) без проведения подобных испытаний в течение нескольких лет или периода действия сертификата о соответствии средства измерений, также учитывая результаты периодической поверки мониторов того же типа.

Б4.3.1.7. Если калибровке подлежат мониторы радона с повышенной точностью при $U_K(\varepsilon) < (15-20)\%$ ($k = 2$), тогда испытания проводятся с каждым монитором отдельно, а значение $U_K(\varepsilon)$ определяется по формуле (Б4.2), в которой первое слагаемое под корнем не учитывается, а C_{cp} принимается как ОА радона, измеренная испытуемым монитором. Индивидуальное значение ε также поддается уточнению в соответствии с формулой (Б4.3).

В любом случае индивидуальное значение $U_K(\varepsilon)$ при $k = 2$ также не может быть меньше неопределенности калибровки образцового монитора $U_{обр}$ ($k = 2$) [7].

Б4.3.1.8. Надежность оценки соответствия в рамках критериев (1) и (2) практически не зависит от ε и $U_K(\varepsilon)$, если продолжительности теста не превышает 1–2 месяца [7], в то же время процедуры испытаний мониторов с низкой чувствительностью занимают существенно больше времени по сравнению с высокочувствительными мониторами, согласно (Б4.1).

Б4.3.2. Контроль фона новых мониторов радона

Б4.3.2.1. Дополнительной метрологической характеристикой мониторов радона является собственный фон детектора, который обычно выражается как эквивалентная ОА радона, тоже в Бк/м³. Фон новых мониторов радона обычно не превышает 3 (максимум 5) Бк/м³, однако по мере эксплуатации фон мониторов может увеличиваться до 10–20 Бк/м³, а при частом измерении высоких концентраций радона фон может превысить 50–100 Бк/м³. В рамках критериев (1) и (2), учитывая значения $S_{ну}$, которые обычно выше 100 Бк/м³, фон мониторов ниже 10 Бк/м³ практически не оказывает влияния на надежность оценки соответствия, поэтому он не учитывается в расчетах, согласно выражению (Б4). Эквивалентный фон, превышающий 15–20 Бк/м³, можно отслеживать и учитывать (путем его вычитания), что, однако, усложняет обеспечение качества измерений, поэтому дальнейшее использование мониторов, фон которых превышает 10–15 Бк/м³, рекомендуется прекращать, по крайней мере, для тестирования зданий в рамках критериев (1) и (2).

Б4.3.2.2. Фон новых мониторов определяется в максимально очищенной от радона среде с помощью одного из следующих двух способов.

Способ 1 основан на непрерывной прокачке (фильтрации) воздуха через достаточный объем активированного угля в замкнутом контуре, включающем закрытый бокс с испытываемыми мониторами.

Способ 2 основан на заполнении закрытого бокса с испытываемыми мониторами газообразным азотом, который предварительно выдерживался не менее одного месяца в баллоне под высоким давлением.

Б4.3.2.3. Продолжительность контроля фона новых мониторов должна обеспечивать минимизацию вклада статистической компоненты $U_{См}$, значение которой не должно превышать 0,20–0,30 при оценке t по формуле (Б4.1).

Б4.3.2.4. Верхняя граница допустимого значения фона новых мониторов одного типа (эквивалентный фон) соответствует максимальному результату измерений ОА радона среди не менее 7 испытываемых мониторов.

Полученное значение эквивалентного фона может применяться в дальнейшем для характеристики произведенных новых мониторов того же типа (или иного типа, но с таким же детектором и конструкцией измерительной камеры) без проведения подобных испытаний в течение нескольких лет или периода действия сертификата о соответствии средства измерений.

Б4.3.3. Периодическая поверка мониторов радона

Б4.3.3.1. Периодическая поверка мониторов радона должна проводиться метрологическими службами с временным интервалом, который определяет производитель при согласовании с метрологической службой. Если анализ результатов ежегодной поверки мониторов одного типа показывает удовлетворительную статистику (например, не более 1% случаев отбраковки), тогда целесообразно увеличение интервала поверки.

Допускается проведение самостоятельного периодического (через 1–2 года) контроля работы непрофессиональных мониторов радона, у которых неопределенность калибровки (или измерения) превышает 30% ($k = 2$). В этом случае для проведения параллельных сравнительных измерений ОА радона необходимо использование аттестованного (поверенного), либо нового (еще не эксплуатировавшегося) монитора радона с установленными значениями ϵ и $U_K(\epsilon)$, а также эквивалентного фона (далее в этом разделе такой монитор называется образцовым). Описание процедур самостоятельных параллельных измерений, включая критерии сравнения, приводятся ниже.

Б4.3.3.2. Контроль эквивалентного фона испытываемого монитора (который эксплуатируется) должен проводиться в хорошо проветриваемом помещении, в котором средняя ОА радона по показаниям образцового монитора не должна превышать 20 Бк/м³ в течение всего периода испытаний.

Продолжительность проверки эквивалентного фона в таких условиях должна обеспечивать минимизацию вклада статистической компоненты $U_{См}$, значение которой не должно превышать 0,10 при оценке t по формуле (Б4.1), выбирая большее значение t при параллельных измерениях с мониторами разного типа.

Если ОА радона, измеренная на испытуемом мониторе, превышает результат на образцовом мониторе более чем на 15 Бк/м³, дальнейшую эксплуатацию испытуемого монитора радона рекомендуется прекратить.

Б4.3.3.3. Контроль калибровки испытуемого монитора может проводиться в помещении с естественно повышенной ОА радона, колебания и средней уровень которой должен соответствовать диапазонам, указанным в Б4.3.1.2, а микроклиматический режим помещения – условиям п.5.1.4.

Продолжительность проверки калибровочного фактора должна обеспечивать минимизацию вклада статистической компоненты U_{Cm} , значение которой не должно превышать 0,05–0,10 при оценке t по формуле (Б4.1), выбирая большее значение t при параллельных измерениях с мониторами разного типа.

Если относительная разность (по модулю) между результатами измерений ОА радона на испытуемом и образцовом мониторах ($[C_{исп}/C_{обр}] - 1$) превышает относительное значение неопределенности калибровки (или измерения), указанное в свидетельстве (или спецификации) испытуемого монитора, его дальнейшая эксплуатация должна быть прекращена (если в свидетельстве указаны пределы относительной погрешности, то относительная разность определяется без модуля).

Б4.3.4. Основные метрологические характеристики мониторов радона

Учитывая рекомендации и указания выше, целесообразно по каждому из типов мониторов радона, предназначенных для тестирования зданий в рамках рационального критерия оценки соответствия, указывать в спецификациях следующие основные метрологические (и дополнительные) характеристики [7]:

- 1) чувствительность монитора (или калибровочный фактор ϵ);
- 2) неопределенность калибровки монитора $U_K(\epsilon)$, выраженная в относительных единицах при $k = 2$ (вместо традиционно указываемых неопределенности или погрешности измерений, которые зависят от ряда параметров и определяются путем расчета по формуле (Б4));
- 3) эквивалентный фон нового монитора, например, не более 3 Бк/м³;
- 4) верхний диапазон измерений ОА радона, например, 1000 или 3000 Бк/м³, в интервале которого гарантируется соответствие установленным характеристикам 1 и 2 (нижний диапазон измерений ОА радона зависит от чувствительности, неопределенности калибровки, продолжительности измерения и эквивалентного фона монитора, поэтому целесообразно ограничиться указанием характеристики 3 вместо традиционно указываемых нижнего диапазона измерений или минимально измеряемой ОА радона [2,3,6,7], которые не имеют практического значения в метрологическом обеспечении тестирования зданий в рамках рационального подхода на основе критериев (1) и (2);
- 5) продолжительность измерения (в часах или днях) концентрации радона в наружном (атмосферном) воздухе на уровне 10 Бк/м³ со статической неопределенностью 30% при $k = 2$, определяемая по формуле (Б4.1);

6) срок службы непрофессиональных ($U_K(\epsilon) > 30\%$) и профессиональных ($U_K(\epsilon) < 30\%$) мониторов, например, не менее 3–5 лет и 10 лет, соответственно, с вероятностью случаев отбраковки при ежегодной проверке (контроле работы), например, не более 1–2% и 0,5%, соответственно.

Б4.3.5. Отображение результатов измерений на мониторах радона

Производителям мониторов радона следует учитывать рекомендации ниже, способствующие эффективно-му применению мониторов для тестирования зданий в рамках рационального критерия оценки соответствия:

- 1) обязательное отображение периодически обновляющейся средней ОА радона $C(t)$ за все время измерения после старта, а также текущей продолжительности измерения t (в часах, днях и месяцах) с периодом обновления 1 или 3 часа для мониторов с высокой чувствительностью и 12 или 24 часа для мониторов с низкой чувствительностью (результат измерения средней ОА радона должен впервые отображаться только после завершения первого периода);
- 2) дополнительное (функциональное) отображение средней ОА радона только за предыдущий период измерения (без использования принципа скользящего среднего), продолжительность которого 1 или 3 часа для мониторов с высокой чувствительностью и 12 или 24 часа для мониторов с низкой чувствительностью

(такое отображение результата показывает временные колебания радона, хотя их динамика не влияет на критерии оценки соответствия, да и вряд ли интересна многим пользователям);

3) выражение измеренной ОА радона должно также предусматривать отображение расчетного значения инструментальной неопределенности U_I , согласно (Б4), в относительных единицах при $k = 2$;

4) в конструкции монитора необходимо предусмотреть кнопку для старта измерений (защищенную от случайного нажатия), а также запись результатов в память (с одним из заданных выше периодов), которые можно скачать;

5) для удобства метрологического контроля необходимо предусмотреть режим работы монитора, в котором вместо расчетной ОА радона отображаются зарегистрированные импульсы или средняя скорость счета импульсов (после начала измерений), включая продолжительность измерений в часах и минутах;

6) независимо от установленного верхнего диапазона измерений ОА радона, а также степени нарушения линейности калибровки мониторов необходимо всегда отображать (включая записывать в память) результат измерений (вплоть до значения 999999 Бк/м³), возможно исключая величину U_I , если превышен верхний диапазон измерений. В случае блокировки вывода результатов, превышающих верхний диапазон измерений (что, к сожалению, реализовано в некоторых моделях мониторов), средняя ОА радона за период теста получается заниженной при его экстремально высоких уровнях, либо не поддается определению вовсе, что существенно затрудняет работу, связанную с мероприятиями по защите зданий от радона.

Комментарий к дискуссионной статье «Кризис регулирования радона в России: дискуссия с регулятором по актуальным вопросам. Часть 1»

(А.А.Цапапов, П.С.Микляев, Т.Б.Петрова, С.И.Кувшинников. АНРИ №4 (119), стр. 70-89)

С.М.Киселев

Федеральное Государственное бюджетное учреждение «Государственный научный центр Российской Федерации – Федеральный медицинский биофизический центр имени А.И. Бурназяна», г. Москва

Представленная статья продолжает развернувшуюся дискуссию на страницах журналов «АНРИ» и «Радиационная гигиена» по актуальным вопросам регулирования радона, которые, в первую очередь, должны быть направлены на совершенствование существующей в стране системы обеспечения радиационной безопасности населения при опасном воздействии на здоровье человека природных источников ионизирующего излучения, в том числе радона и продуктов его распада.

Поднятые авторами вопросы регулирования радона следует рассматривать как одно из приоритетных направлений государственной политики в области обеспечения ядерной и радиационной безопасности, функции по выработке и реализации которого, включая вопросы нормативно-правового регулирования, а также осуществлению государственного санитарно-эпидемиологического надзора возложены на Федеральную службу по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека.

Рассматривая обсужденные авторами предложения по совершенствованию существующей в стране системы обеспечения радиационной безопасности населения при воздействии на здоровье человека радона и дочерних продуктов распада, представляется целесообразным отметить, что принципиальное решение этой проблемы, как показывает мировой опыт, возможно только в рамках утвержденной и полноценно функционирующей государственной программы по защите населения от опасного воздействия радона. Это подтверждает и непродолжительный отечественный опыт, накопленный в ходе выполнения утвержденной 30 лет назад ФЦП «Радон», которая по мнению ведущих специалистов, хотя и продолжалась незначительное время, сыграла ключевую роль в становлении и последующем развитии радоновой проблемы [1].

Логика развития развернутой авторами дискуссии по актуальным вопросам регулирования радона диктует необходимость консолидации усилий экспертов и специалистов из разных областей знаний (медики, гигиенисты, геологи, физики, строители, преподаватели и др.) и на разных уровнях принятия управленческих решений для формирования национального плана действий и принятия соответствующей федеральной целевой программы. Именно на площадке обновленной ФЦП «Радон» возможно достижение консенсуса в решении поднятых авторами актуальных вопросов регулирования радона.

Литература

1. Маренный А.М., Киселев С.М. Национальные радоновые программы: Опыт реализации и задачи на перспективу // Радиационная гигиена. 2019. Т. 12. № S2. С. 97-108. DOI: 10.21514/1998-426X-2019-10-2s-97-108.



ППСР 2025

Проблемы прикладной спектрометрии и радиометрии

*XVII Международное совещание
им. Владимира Николаевича
Даниленко*



 **RITVERC**
Isotopenprodukte

 **АСРМ**

 **ПОЛИТЕХ**
Санкт-Петербургский
политехнический университет
Петра Великого

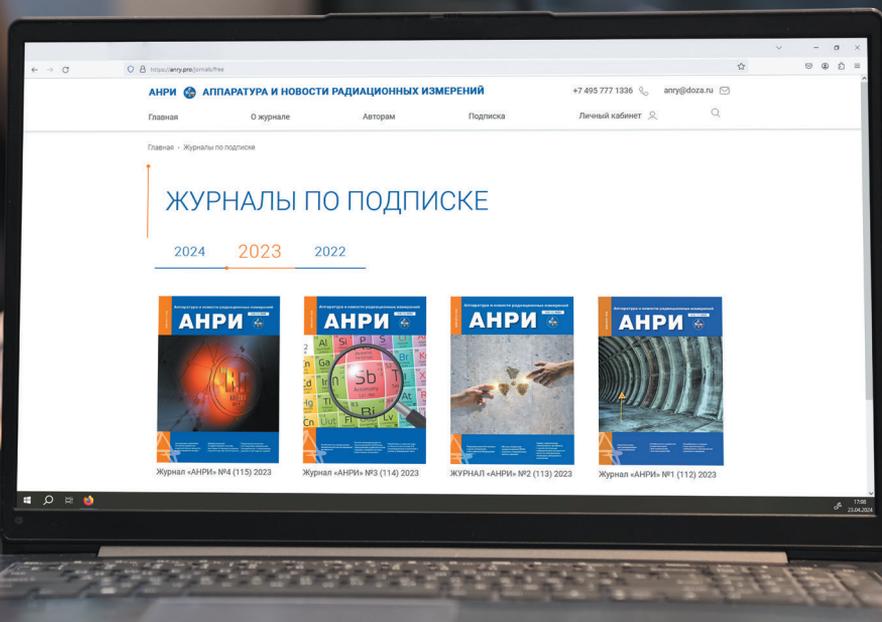
ppsr.pro

Регистрация:
ppsr25@ritverc.com

Продолжается подписка на журнал

«Аппаратура и новости радиационных измерений» — сетевое издание, полностью идентичное бумажной версии журнала «АНРИ»

Сайт сетевого издания находится по адресу www.anry.pro



Преимущества сетевого издания:

- более быстрое получение информации
- возможность читать статьи на любом электронном носителе
- возможность поиска по всему массиву текстов
- возможность масштабирования текстов
- возможность копирования материалов

На сайте имеются **электронные версии** журналов АНРИ за **2003-2024** годы.

Полные версии журналов за **2003-2022** годы находятся в бесплатном доступе **без оформления подписки**.