

- скопления лавообразных топливосодержащих материалов в помещении 210/7 объекта «Укрытие». — Там же, 2015, вып. 24, с. 70—84.
10. **Огородников Б.И., Хан В.Е., Ковальчук В.П.** Характеристики радиоактивных аэрозолей около скопления лавообразных топливосодержащих материалов в помещении 012/15 объекта «Укрытие» в 2014 г. — Там же, вып. 25, с. 125—138.
  11. **Огородников Б.И., Хан В.Е.** Радон в подреакторном помещении 012/7 объекта «Укрытие». — Там же, 2017, вып. 28, с. 82—91.
  12. **Нормы** радиационной безопасности (НРБ-99/2009). СанПин 2.6.1.2523—09. М.: Федеральный центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора, 2009.
  13. **Крисюк Э.М.** Радиационный фон помещений. М.: Энергоатомиздат, 1989. 120 с.
  14. **Postendörfer J.** Properties and behaviour of radon and their decay products in air. — J. Aerosol Sci., 1994, v. 25, p. 219—263.
  15. **Papastefanou C.** Radioactive Aerosols. Elsevier, 2008. 187 p.
  16. **Огородников Б.И., Хан В.Е.** Объемная активность радона и ее изменчивость в деаэрационной этажерке объекта «Укрытие». — Проблемы безопасности атомных электростанций і Чернобиля, 2016, вып. 27, с. 80—88.
  17. **Огородников Б.И., Хан В.Е.** Радон и его дочерние продукты в деаэрационной этажерке объекта «Укрытие» Чернобыльской АЭС. — АНРИ, 2017, № 2(89), с. 49—58.
  18. **Цапалов А.А., Кувшинников С.И.** Зависимость объемной активности радона в помещениях от разности внутренней и наружной температур воздуха. — Там же, 2008, № 2(53), с. 37—43.
  19. **Огородников Б.И., Хан В.Е.** Радон в подреакторном помещении 012/7 объекта «Укрытие». — Проблемы безопасности атомных электростанций і Чернобиля, 2017, вып. 28, с. 82—91.
  20. **Sources, Effects and Risks of Ionizing Radiation.** United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. Rep. of the General Assembly, United Nations, New York, 2000.
  21. **Арутюнян Р.Э., Большов Л.А., Боровой А.А. и др.** Ядерное топливо в объекте «Укрытие». М.: Наука, 2010. 240 с.
  22. **Норми** радіаційної безпеки України НРБУ-97/Д-2000. Киев, 2000.

УДК 53.087.92

### РАДИОМЕТРИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС СРЕДСТВ ДЕТЕКТИРОВАНИЯ ОБЪЕМНОЙ АКТИВНОСТИ РАДИОАКТИВНЫХ БЛАГОРОДНЫХ ГАЗОВ

*Ерофеев П.Н., Иванов А.А., Кузьмина О.Ш., Самойлова М.А., Фертман Д.Е., Чебышов С.Б., Черкашин И.И., Шевцов С.В. (АО «СНИИП», г. Москва)*

Газоаэрозольный выброс из вентиляционных труб является одним из факторов, по которому оценивается влияние АЭС на окружающую среду. Основная цель такого контроля — подтверждение соответствия выброса требованиям, установленным нормативными документами [1—3]. Допустимые выбросы радиоактивных газов и аэрозолей в атмосферу приведены в табл. 1 [2]. Наибольшую долю газоаэрозольных выбросов составляют радиоактивные благородные газы, в связи с чем их контролю необходимо уделять особое внимание. Суммарная активность выбросов предприятий Госкорпорации «Росатом» на 98% обусловлена β-излучающими нуклидами, в которых доля радиоактивных благородных газов составляет 96,18%.

В общем случае газоаэрозольный выброс представляет собой многокомпонентную среду, состоящую из радиоактивных благородных газов, радиоактивных аэрозолей, а также нерадиоактивных паров, аэрозолей и пыли [4]. Среди них особое внимание уделяется радиоактивным благородным газам, поскольку, по существу,

Таблица 1. Годовые допустимые выбросы газовых радиоактивных отходов в атмосферу, ГБк

Радионуклид	АЭС		
	с РБМК	с ВВЭР и быстрыми реакторами	с ЭГП-6
Радиоактивные благородные газы	3,7·10 <sup>6</sup>	0,69·10 <sup>6</sup>	2·10 <sup>6</sup>
<sup>131</sup> I (газовая + аэрозольная форма)	93	18	18
Аэрозоли:			
<sup>60</sup> Co	2,5	7,4	7,4
<sup>134</sup> Cs	1,4	0,9	0,9
<sup>137</sup> Cs	4	2	2

именно они являются индикаторами нарушений нормальной радиационной обстановки на контролируемом объекте. В табл. 2 приведены характеристики наиболее значимых из них, образующихся при делении уранового топлива [5]. Спектрометрические γ-линии отдельных нуклидов в газоаэрозольном выбросе малоразличимы, и для получения достоверной информации об их

Т а б л и ц а 2. Основные характеристики радиоактивных благородных газов

Нуклид	Относительное содержание, %		$T_{1/2}$	$\langle E_{\beta} \rangle$ , МэВ	$I_{\beta}$ , %	$E_{\beta_{\max}}$ , МэВ	$E_{\gamma}$ , МэВ	$I_{\gamma}$ , %
	ВВЭР	РБМК						
$^{41}\text{Ar}$	0,2	0,3	109,61 мин	0,459	99,2	1,198	1,293	99,2
				1,076	0,8	2,492	1,677	0,05
$^{85}\text{Kr}$	6	0,7	10,74 года	0,252	99,6	0,687	0,513	0,4
$^{85m}\text{Kr}$	5,4	6,6	4,48 ч	0,238	41	0,71	0,13	0,3
				0,29	30,5	0,84	0,151	75,2
$^{87}\text{Kr}$	1	13,4	76,3 мин	0,5	9,4	1,333	0,402	50
				1,5	41	3,486	0,845	7,3
				1,694	30,5	3,888	2,554	9,2
$^{88}\text{Kr}$	2,2	18,6	2,83 ч	0,167	67	0,526	0,196	26
				1,235	14	2,918	0,835	13
							1,53	10,9
							2,196	13,2
						2,392	34,6	
$^{133}\text{Xe}$	72	35,2	5,25 сут	0,1		0,346	0,081	36,9
$^{135}\text{Xe}$	13,2	25,4	9,14 ч	0,173	3	0,557	0,25	90
				0,31	96	0,91	0,61	2,9

**Примечания.**  $T_{1/2}$  — период полураспада;  $\langle E_{\beta} \rangle$ ,  $E_{\beta_{\max}}$  — средняя и наибольшая энергия  $\beta$ -частиц в непрерывном энергетическом спектре  $\beta$ -излучения соответственно;  $I_{\beta}$ ,  $I_{\gamma}$  — абсолютная интенсивность  $\beta$ -, абсолютная интенсивность  $\gamma$ -излучения соответственно;  $E_{\gamma}$  — энергия фотонов.

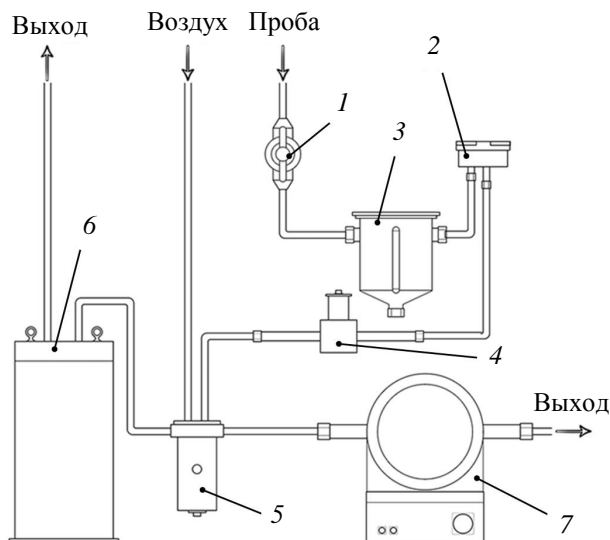
вкладе требуется высокое разрешение, которое могут обеспечить полупроводниковые детекторы. Применение детекторов с разрешающей способностью, достаточной только для идентификации, экономически необоснованно для систематического мониторинга выбросов АЭС. Для таких целей, как правило, применяются радиометрические средства. Контроль объемной активности радиоактивных благородных газов в газоаэрозольных выбросах, поступающих за пределы АЭС, позволяет оперативно отслеживать радиационно-экологическую обстановку на прилегающих к АЭС территориях. В то же время измерения косвенно реализуют и задачи мониторинга герметичности ТВС и основных контуров теплопередачи, включая газоаэрозольную среду производственных помещений, связанных с оборудованием основного циркуляционного контура, состояние фильтрующих систем, контроль уровня объемной активности в необслуживаемых помещениях, вентиляционных и локализуемых системах.

Для АЭС и других предприятий ЯТЦ разработано устройство, обеспечивающее контроль объемной активности радиоактивных благородных газов по  $\beta$ -излучению в широком диапазоне:  $10^3$ — $10^{17}$  Бк/м<sup>3</sup>. Его можно применять в

составе систем и приборных комплексов на объектах с ядерными энергетическими установками, а также на других объектах, связанных с получением, переработкой и использованием радиоактивных материалов.

Входные воздухозаборные и пробоотборные коммуникации оборудованы отсечным клапаном 1 для ручного управления подачей пробы, фильтром 2 и каплеотбойником 3 для исключения попадания в измерительные объемы детекторов влаги, пыли и аэрозольных фракций, а также расходомером 4 для контроля объема прокачанной пробы (рис. 1). Излучение регистрируется двумя блоками детектирования: в диапазоне измерения объемной активности низкого уровня блоком БДГБ-51Р 6, среднего и высокого — БДГБ-50Р 7. Расположение пробы между двумя блоками регулирует крановый распределитель 5. Управление устройством осуществляет блок управления БУМ-213Р.

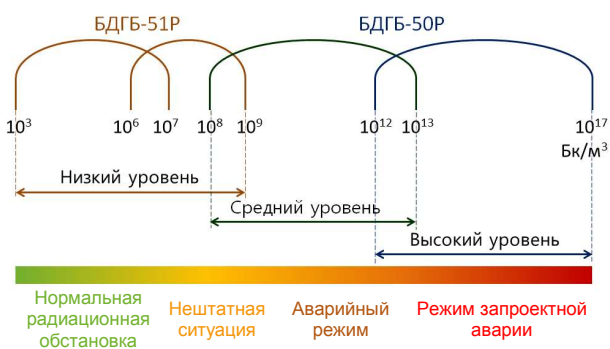
На несущей конструкции устройства размещаются пробоотборные коммуникации: проба из контролируемого помещения при открытом отсечном клапане поступает в каплеотбойник, предназначенный для удаления капельной влаги при отборе проб воздуха из систем вентиляции помещений. Затем для удаления из пробы пыли



Р и с. 1. Структурная схема устройства

и аэрозольной составляющей проба проходит через фильтр типа АФА. Узел расходомера фиксирует объем прокачанной пробы с погрешностью не более  $\pm 10\%$ . Крановый распределитель позволяет управлять направлением пробы: в зависимости от объемной активности он направляет ее в один из блоков детектирования, в то время как во второй подается чистый воздух для снижения собственного фона устройства. Распределитель может управляться автоматически, удаленно или вручную. Направление пробы отображается на шкале распределителя. Устройство может включать в себя побудитель расхода воздуха. При разработке устройства диапазон измерения был разбит на три условных поддиапазона, Бк/м<sup>3</sup>: низкий  $10^3$ — $10^9$ , средний  $10^8$ — $10^{13}$  и высокий  $10^{12}$ — $10^{17}$  (рис. 2). Такое разбиение является условным и индивидуально для каждого предприятия.

Блок детектирования БДГБ-51Р предназначен для измерения объемной активности низкого уровня. Метод заключается в прокачке контролируемой пробы через измерительный объем



Р и с. 2. Условные поддиапазоны регистрации

блока и одновременной регистрации  $\beta$ -излучения сцинтилляционным детектором. Сцинтилляции, регистрируемые фотоэлектронным умножителем, преобразовываются в импульсы напряжения. Средняя частота следования импульсов на выходе блока детектирования преобразовывается в объемную активность.

Блок детектирования представляет собой сцинтилляционный счетчик — газ пропускается через измерительный объем, в котором размещены пластины из сцинтиллирующего полистирола, находящиеся в оптическом контакте с фотоумножителем. Применение детектора данного типа позволяет повысить эффективность регистрации и обеспечить слабую температурную зависимость результатов измерения, благодаря чему не требуется дополнительная обработка для компенсации температурной нестабильности, а необходимая чувствительность может быть достигнута при сравнительно небольших объемах измерительной камеры, что позволяет сократить габариты и массу защиты от внешнего излучения. Объем измерительной камеры составляет 1,5 л. Масса блока детектирования не превышает 67,5 кг, габаритные размеры —  $\varnothing 260 \times 520$  мм. Основная относительная допускаемая погрешность блока детектирования в диапазоне  $10^3$ — $10^4$  Бк/м<sup>3</sup> составляет  $\pm 30\%$ , в остальном  $\pm 20\%$ . Уровень собственного фона при нормальной эксплуатации не более 12 имп./с. В зависимости от объемной активности контролируемой пробы применяются разные коэффициенты усиления.

Возможность измерения объемной активности среднего и высокого уровня реализована в блоке детектирования БДГБ-50Р. Основная относительная допускаемая погрешность блока не превышает  $\pm 20\%$ . Уровень собственного фона при нормальной эксплуатации не более 0,05 имп./с. Такой уровень фона при относительно небольших массогабаритных характеристиках достигается благодаря использованию в конструкции блока вольфрамовой защиты от  $\gamma$ -фона. Масса блока детектирования не более 55 кг, габаритные размеры  $278 \times 276 \times 238$  мм.

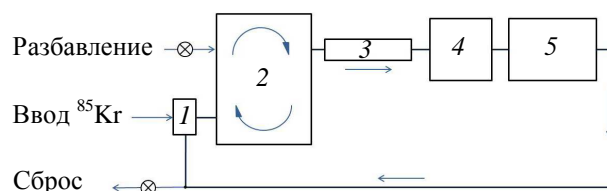
Принцип работы блока заключается в прокачке контролируемой пробы через измерительную камеру и регистрации  $\beta$ -излучения кремниевыми ионно-имплантированными детекторами. Объем измерительной камеры составляет

12,8 мл. Два измерительных канала одновременно регистрируют  $\beta$ -излучение: детекторы преобразовывают энергию  $\beta$ -частиц в электрический заряд, который усиливается и преобразуется в импульс напряжения, после чего подается на селектор амплитуды узла обработки.

Для возможности регистрации объемной активности радиоактивных благородных газов до  $10^{17}$  Бк/м<sup>3</sup> необходимо ограничить поток излучения. Для этого в одном из двух измерительных каналов предусмотрено коллимирование потока излучения, падающего на чувствительную поверхность детектора. Перед детектором размещен свинцовый коллиматор с отверстием диаметром 3 мм, концентрирующий пучок излучения на центральной части детектора. Второй детектор расположен в непосредственной близости к измерительной камере. Отличительной особенностью блока является отсутствие сорбции, обеспеченное тем, что проба не соприкасается с детекторами, а материалы и технология изготовления измерительной камеры выбраны оптимальным образом.

Блок управления БУМ-213Р обеспечивает коммутацию и питание всех узлов, входящих в состав устройства, получает и обрабатывает частотные сигналы с блоков детектирования, собирает и анализирует данные о состоянии узлов устройства и на основании этой информации осуществляет управление.

На жидкокристаллическом дисплее блока управления отображается информация о текущей объемной активности, направлении движения пробы, объемном расходе и объеме прокачанной за текущий период пробы. На лицевой панели расположены три светодиода: зеленый, желтый и красный. Зеленый соответствует нормальной радиационной обстановке, желтый загорается при превышении предупредительной, красный — аварийной уставки. Пороговые уставки задаются оператором с помощью программы технологического контроля. В окне программы технологического контроля отображается состояние узлов устройства и направление движения пробы. В правой части окна программы отображаются текущая объемная активность, объемный расход, состояние узлов устройства. Также предусмотрены возможность обращения к архиву и режим диагностики, который позволяет проверить работоспособность блоков детектирования, кранового распределителя и расходомера.

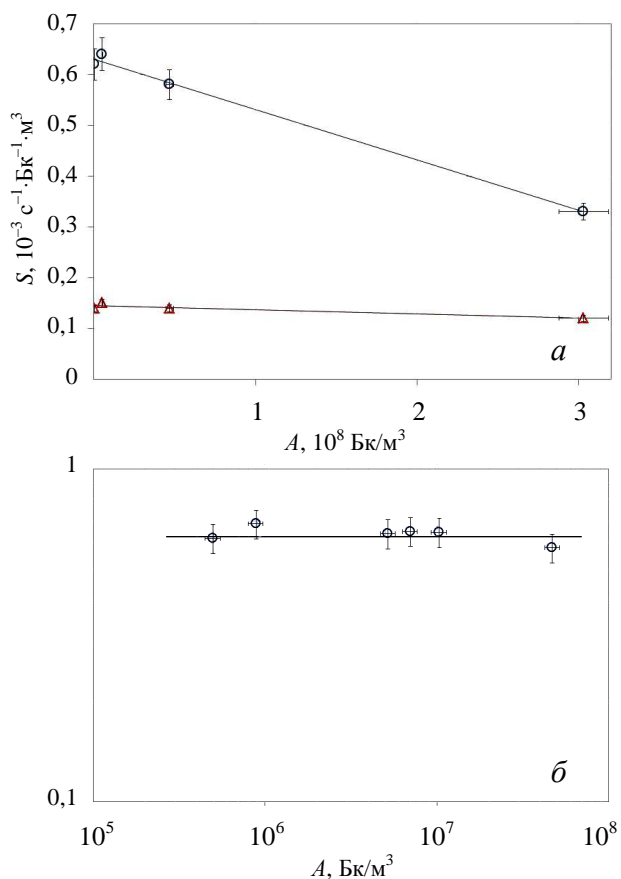


Р и с. 3. Структурная схема испытательного стенда: 1 — пенал для вскрытия ампулы с  $^{85}\text{Kr}$ ; 2 — герметичный бак с запорными клапанами; 3 — циркуляционный насос; 4 — испытуемый блок детектирования; 5 — рабочий эталон (РГБ-07)

Метрологические испытания комплекса проводили методом непосредственного сличения [6]. В соответствии с [7] был собран стенд, включающий в себя образцовый радиометр газов РГБ-07 (рис. 3).  $^{85}\text{Kr}$  вводили в испытательный контур с помощью специального пенала, затем газовая среда циркулировала внутри контура до полного перемешивания. Показания снимали одновременно с испытываемого блока детектирования и рабочего эталона РГБ-07. Активность пробы снижали путем разбавления чистым воздухом, поступающим из системы вентиляции. Таким образом испытывали каждый блок детектирования. Измерения были проведены для двух поддиапазонов блока детектирования БДГБ-51Р (условно обозначим их Д1 и Д2), отличающихся коэффициентом усиления. Время циркуляции пробы в контуре до полного перемешивания при объемном расходе 30 л/мин составило 10 мин.

Как видно на рис. 4, а, в диапазоне  $5 \cdot 10^6$ — $3 \cdot 10^8$  Бк/м<sup>3</sup> чувствительность канала Д2 блока постоянна, канала Д1 монотонно убывает с повышением активности. В диапазоне регистрации  $5 \cdot 10^5$ — $5 \cdot 10^7$  Бк/м<sup>3</sup> чувствительность канала Д1 блока постоянна (рис. 4, б). Таким образом, для оптимального перекрытия поддиапазонов блока детектирования БДГБ-51Р выбрана активность перехода во второй измерительный поддиапазон в точке  $10^7$  Бк/м<sup>3</sup>.

Аналогичным образом были проведены испытания блока детектирования БДГБ-50Р. Для достижения большей объемной активности в измерительной камере при первом измерении использовали только часть измерительного контура. В течение 15 мин в измерительном объеме устанавливалась объемная активность контролируемой среды с  $^{85}\text{Kr}$ . Объемная активность в контуре после перемешивания составила  $3,2 \cdot 10^{12}$  Бк/м<sup>3</sup>, затем постепенно снижалась.

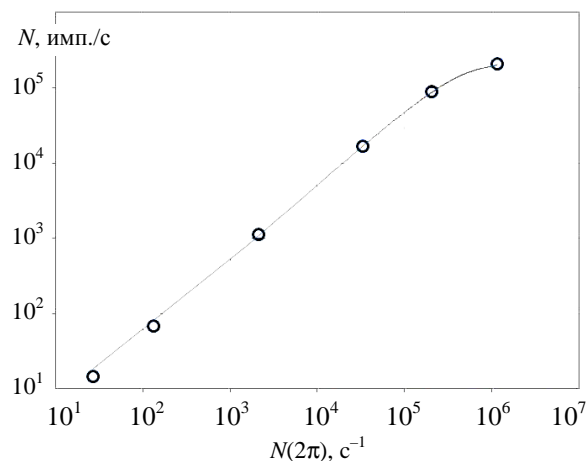


Р и с. 4. Зависимость чувствительности блока детектирования Д1 (○), Д2 (△)  $S$  от объемной активности пробы (показания РГБ-07)  $A$  в диапазоне  $5 \cdot 10^6$ — $3 \cdot 10^8$  (а),  $5 \cdot 10^5$ — $5 \cdot 10^7 \text{ Bk/m}^3$  (б) (в логарифмическом масштабе)

Испытания показали, что чувствительность блока БДГБ-50Р в диапазоне измерения объемной активности среднего уровня составляет  $7 \cdot 10^{-8} \text{ c}^{-1} \cdot \text{Bk} \cdot \text{m}^{-3}$ , высокого уровня —  $5 \cdot 10^{-12} \text{ c}^{-1} \cdot \text{Bk} \cdot \text{m}^{-3}$ .

Поскольку максимальная объемная активность газовой пробы ограничена, для проверки линейности характеристики преобразования детекторов были проведены испытания с использованием набора образцовых источников  $\beta$ -излучения типа 1С0 с  $^{90}\text{Sr}$  (рис. 5). Источник с помощью специального держателя помещали непосредственно перед детектором.

Линейность счетной характеристики сохраняется до  $\sim 100$  тыс. имп./с, что эквивалентно объемной активности  $\sim 1,4 \cdot 10^{12} \text{ Bk/m}^3$  для поддиапазона среднего и  $2 \cdot 10^{16} \text{ Bk/m}^3$  высокого уровня. Нелинейность характеристики не превышает  $\pm 10\%$ . Линейная аппроксимация характеристики (поправка на «мертвое время») позволяет сделать вывод о возможности измерения объемной активности до  $10^{13}$  в среднем и



Р и с. 5. Зависимость средней частоты следования импульсов блока детектирования БДГБ-50Р  $N$  от внешнего  $\beta$ -излучения образцового источника с  $^{90}\text{Sr}$  (1С0)  $N(2\pi)$  (в логарифмическом масштабе)

$10^{17} \text{ Bk/m}^3$  высоком поддиапазоне блока детектирования БДГБ-50Р.

В ходе разработки УДГБ-46Р был учтен опыт эксплуатации аналогичных устройств и блоков детектирования объемной активности радиоактивных благородных газов, а также особенности и недостатки работы устройств подобного типа. В УДГБ-46Р расширен диапазон измерений по сравнению с аналогичными техническими средствами. Устройство объединяет в себе пробоотборный комплекс, узлы детектирования и обработки результатов, что позволяет оптимизировать контроль объемной активности на АЭС и других предприятиях ЯТЦ.

Испытания блоков детектирования с применением радиоактивного газа  $^{85}\text{Kr}$  и рабочего эталона — радиометра газов РГБ-07, а также источников  $\beta$ -излучения с  $^{90}\text{Sr}$  подтверждают заявленные метрологические характеристики устройства. Таким образом, разработанный радиометрический комплекс средств детектирования обеспечивает контроль объемной активности по  $\beta$ -излучению радиоактивных благородных газов в контролируемой газовой среде в диапазоне  $10^3$ — $10^{17} \text{ Bk/m}^3$ .

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Общие** положения обеспечения безопасности атомных станций НП-001—15.
2. **Нормы** радиационной безопасности (НРБ-99/2009) СанПиН 2.6.1.2523—09.
3. **Оборудование** для постоянного контроля радиоактивности в газообразных выбросах. Ч. 3. Специальные тре-



- бования к устройствам, измеряющим содержание радиоактивных благородных газов в газообразных выбросах. МЭК 60761-3, 2002.
4. Фертман Д.Е., Чебышов С.Б. Радиометрия сред. М.: АО ФИД «Деловой экспресс», 2017.
5. Live Chart of Nuclides. Интерактивная таблица нуклидов на сайте МАГАТЭ.

6. Средства измерений объемной активности радионуклидов в газе. Общие технические требования и методы испытаний ГОСТ 21496—89.
7. Государственная система обеспечения единства измерений (ГСИ). Государственный специальный эталон и общесоюзная поверочная схема для средств измерений активности нуклидов в бета-активных газах ГОСТ 8.039—79.

УДК 53.06

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ РАСШИРЕНИЯ ДИАПАЗОНА РАБОЧЕГО РАССТОЯНИЯ ПРИ ПОВЕРКЕ СПЕКТРОМЕТРИЧЕСКИХ ЭТАЛОНОВ АКТИВНОСТИ РАДИОНУКЛИДОВ

Стяжкин В.А., Васильев И.О. (ФГБУ «ГНМЦ» Минобороны России, г. Мытищи, Московская обл.)

В настоящее время спектрометрические эталоны активности радионуклидов, представляющие собой источники  $\gamma$ -излучения, проверяются методом как прямых измерений, так и компаратора с помощью полупроводникового гамма-спектрометра и набора эталонных источников — мер активности  $\gamma$ -излучающих радионуклидов, которые в совокупности являются одной из функциональных частей вторичного эталона единицы активности.

В качестве спектрометрических эталонов и мер  $\gamma$ -активности применяются источники типа ОСГИ, отличающиеся между собой применяемыми радионуклидами и их номинальной активностью [1]. Каждый источник ОСГИ представляет собой подложку в виде диска из двух слоев полиамидной пленки, между которыми в центре нанесено и загерметизировано радиоактивное вещество в виде соли радионуклида. Подложка зажата в кольцевой обойме из алюминиевых сплавов на одинаковом расстоянии от ее торцов. Активная часть источника имеет диаметр не более 3 мм и малую толщину, что позволяет считать источник точечным и без самопоглощения при реальной геометрии измерения фотонного излучения на спектрометрах (рис. 1).

Спектрометрические эталоны проверяются в соответствии с методикой [2], согласно которой активность основного радионуклида измеряется относительным методом с помощью компаратора в идентичных геометрических условиях путем сравнения скорости счета импульсов в пиках полного поглощения проверяемого и эта-



Р и с. 1. Внешний вид источника ОСГИ

лонного источников. Условия измерений регламентированы единой геометрией на фиксированном расстоянии  $R_i$  от источника излучения до детектора  $25 \text{ мм} \leq R_i \leq 200 \text{ мм}$ . Для проверки всех спектрометрических эталонов типа ОСГИ необходимо иметь в составе вторичного эталона большой набор эталонных мер (20 радионуклидов) с широким диапазоном активности каждого (пять номинальных значений активности). Поэтому в настоящей работе предложено определить минимально возможное рабочее расстояние источник—детектор и тем самым расширить нижнюю границу диапазона активности проверяемых источников ионизирующего излучения ОСГИ. Это позволит сократить число эталонных мер. Для этого предложено провести измерения в трех позициях: ОСГИ располагается на блоке детектирования —  $R_1 = 0 \text{ мм}$ , дистансерном устройстве 1 ( $R_2$ ) и 2 ( $R_3$ ) с расстоянием источник—детектор 3 и 50 мм соответственно (рис. 2).

Для исследований использовали источники ОСГИ, поверенные в качестве эталонов 1-го разряда с основной относительной погрешностью 3%. Поочередно измеряли спектры восьми