

УДК 539.1.074.3

РЕГИСТРИРУЮЩИЙ БЛОК СПЕКТРОМЕТРА ГАММА-ИЗЛУЧЕНИЯ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ОБЪЕМНОЙ АКТИВНОСТИ ИНЕРТНЫХ РАДИОАКТИВНЫХ ГАЗОВ

© 2025 г. В. Н. Юров^{а, *}, Ю. А. Трофимов^{а, b}, Е. Э. Лупарь^а

^аНациональный исследовательский ядерный университет “МИФИ”, Москва, 115409 Россия

^бИнститут биоорганической химии имени академиков М.М. Шемякина и Ю.А. Овчинникова РАН,
Москва, 117871 Россия

*E-mail: VNYurov@mephi.ru

Поступила в редакцию 10.01.2024 г.

После доработки 10.01.2024 г.

Принята к публикации 23.01.2024 г.

Описана конструкция и приведены характеристики регистрирующего блока спектрометра газовой среды для измерения гамма-излучения инертных радиоактивных газов (ИРГ), образующихся в результате функционирования реакторов АЭС и поступающих в окружающую среду в составе газо-аэрозольных выбросов. Регистрация гамма-излучения ИРГ осуществляется в двух камерах объемом 10^4 см^3 и 2 см^3 одним сцинтилляционным детектором на основе кристалла CeBr_3 размером $\varnothing 51 \times 51 \text{ мм}$. Энергетический диапазон спектрометра – 0.05–3.0 МэВ. Коммутация газовых вводов-выводов позволяет как одновременные, так и поочередные измерения в обеих камерах, что обеспечивает расчетный динамический диапазон измеряемых активностей ИРГ от 10^3 до 10^{13} Бк/м^3 с пределами относительной погрешности измерений в линиях излучения нуклидов $\pm 50\%$ при длительности временных интервалов от 1 до 500 с, зависящей от активности.

Ключевые слова: инертные радиоактивные газы, гамма-излучение, спектрометр газовой среды, сцинтилляционный кристалл CeBr_3

DOI: 10.56304/S2079562924060472

ВВЕДЕНИЕ

В процессе эксплуатации атомных электростанций (АЭС) в активных зонах их ядерных реакторов накапливаются радиоактивные продукты деления (РПД), в том числе летучие радиоактивные изотопы йода и инертных газов: криптона и ксенона. Дополнительно в результате активации нейтронами стабильного изотопа аргона образуется радиоактивный изотоп Аргон-41. При нормальном режиме АЭС обеспечивается локализация основного количества РПД в реакторной установке, системах очистки теплоносителя и газов. Но даже в безаварийном режиме РПД, накапливающиеся в оболочках тепловыделяющих элементов и трубопроводов теплоносителя, могут попадать в теплоноситель и в помещения АЭС через дефекты герметизации. Через систему вентиляции загрязненный РПД воздух выбрасывается в окружающую среду. Выбросы состоят в основном из инертных радиоактивных газов (ИРГ, до 90% суммарной активности выбросов АЭС), малых количеств продуктов деления ядерного топлива и продуктов нейтронной активации элементов конструкции и теплоносителя реактора. В табл. 1 при-

ведены наиболее распространенные нуклиды ИРГ содержащиеся в выбросах АЭС и их парциальный вклад в облучение населения по данным работ [1–3].

Актуальность контроля воздушных выбросов АЭС определяется двумя ключевыми аспектами радиационной безопасности ядерных технологий, а именно, контролем уровня общей радиоактивности жидких и газообразных сред и обнаружением и измерением в их составе концентраций реперных радионуклидов. Это позволяет судить о состоянии основного технологического оборудования энергоблоков АЭС, а также контролировать уровень радиационного воздействия на население и окружающую среду, как в режиме оперативных измерений, так и с целью получения мотивируемых долгосрочных прогнозов радиационного воздействия.

В соответствии с нормативными документами [3–5] средства контроля объемной активности ИРГ в воздушных выбросах должны обеспечивать измерение активности радионуклидов, приведенных в табл. 1. Помимо приведенного списка в России также требуется контроль изотопов ^{127}Xe и $^{133\text{m}}\text{Xe}$,

Таблица 1. Наиболее интенсивные линии излучения основных радионуклидов в газовых выбросах АЭС* [1–3]

Нуклид	E_γ , кэВ	Выход, %	Керма- постоянная, $\text{аГр} \cdot \text{м}^2 / (\text{Бк} \cdot \text{с})$	Парциальный вклад нуклида в облучение населения, %	Период полураспада
^{41}Ar	1290	99	42.86	51.2	1.83 ч
^{85}Kr	514	0.4	0.084	0.1	10.75 год
$^{85\text{m}}\text{Kr}$	151.2	75.5	7.353	0.36	4.48 ч
	304.9	14			
^{87}Kr	402.6	49.5	24.38	3.4	76 мин
	2554.9	9.3			
	845.5	7.25			
^{88}Kr	2392.1	34.6	63.64	13.6	2.8 ч
	196.32	26			
	834.8	13			
^{89}Kr	220.9	20	64.5	<0.001	189.6 с
	585.8	16.6			
^{133}Xe	81	37.7	3.309	3.0	5.24 сут
^{135}Xe	249.8	90	7.97	0.04	9.1 ч
$^{135\text{m}}\text{Xe}$	526	81.2	16.64	7.2	15.6 мин
^{137}Xe	455.5	31.2	6.698	4.1	229.6 с
^{138}Xe	258.3	31.5	34.27	< 0.001	14.1 мин
	1768.26	16.7			

* В таблице приведены медианные значения показателей по доступным данным годовых выбросов для АЭС с реакторами разных типов в Европе, поскольку состав ИРГ в выбросах специфичен для каждой станции и не имеет устойчивого соотношения активностей во времени [1].

однако в данной работе они не рассматриваются, так как их парциальный вклад в дозу облучения минимален [1]. Контроль объемной активности ИРГ должен проводиться в диапазоне от 10^3 до $3.7 \cdot 10^{12}$ Бк/м³ с обеспечением идентификации радионуклидов в газо-воздушной пробе. Погрешность измерений активности должна быть в пределах $\pm 60\%$ при длительности интервала измерений 100–1000 с. В табл. 2 представлены современные отечественные разработки спектрометрической аппаратуры для измерения радиоактивности нуклидов. Видно, что ни один из приборов не соответствует требованиям по диапазону измеряемых активностей, при этом в доступной документации отсутствуют данные об оперативности контроля при минимальной активности.

ВЫБОР ДЕТЕКТОРА ДЛЯ РЕГИСТРИРУЮЩЕГО БЛОКА СПЕКТРОМЕТРА ГАЗОВОЙ СРЕДЫ (СГС)

Для осуществления контроля концентраций и идентификации нуклидов ИРГ на радиационно-опасных объектах и в выбросах в атмосферу требуется измерительная аппаратура, в состав которой входят спектрометрические детекторы, обла-

дающие высокими энергетическим разрешением и эффективностью регистрации гамма-излучения в диапазоне 0.050–3.0 МэВ, высокой загрузочной способностью (не менее 10^5 имп./с), низким собственным фоном и высокой радиационной стойкостью. Этим требованиям удовлетворяют сцинтилляционные кристаллические детекторы (СД) и полупроводниковые детекторы (ППД). СД имеют преимущество по эксплуатационным характеристикам в части обеспечения широких рабочих температурных диапазонов и стойкости к механическим воздействиям, поэтому чаще применяются в контрольно-измерительной аппаратуре АЭС. Тогда как ППД из особо чистого германия (ОЧГ) как правило применяются при необходимости проведения измерений с предельно высоким энергетическим разрешением.

В качестве детекторов для регистрирующего блока СГС нами были рассмотрены сцинтилляционные кристаллы новых типов: CeBr_3 , $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$, $\text{LaBr}_3(\text{Ce}, \text{Sr})$. По сравнению с широко применяющимся в настоящее время кристаллом $\text{NaI}(\text{Tl})$ данные детекторы обладают в 1.5–3 раза лучшим энергетическим разрешением и значительно большей радиационной стойкостью (табл. 3). Однако суще-

Таблица 2. Характеристики выпускаемой спектрометрической аппаратуры для измерения объемной активности газов

Диапазон измерений объемной активности, Бк/м ³	Погрешность измерения активности, %	Энергетический диапазон измерений, кэВ	Метод измерений
<i>ООО НПП “Радико”, Спектрометр для измерения объемной активности гамма-излучающих радионуклидов в газе СГГ-01 [6]</i>			
$3 \cdot 10^2 - 5 \cdot 10^9$	± 50	50–3000	Полупроводниковый ОЧГ детектор, сосуд Мари-нелли, энергетическое разрешение <1%.
<i>ЗАО НПП “Аспект”, УДС-ГЦ-В380 38×38-RS485 [7]</i>			
—	—	50–3000	Сцинтилляционная спектрометрия, кристалл LaBr ₃ (Ce) Ø38 × 38 мм, энергетическое разрешение 3.5% на линии 662 кэВ.
<i>ФГУП НИТИ им. А.П. Александрова, Радиометр-спектрометр для контроля ОА ИРГ МГГ-010 (верхняя строка) и МГГ-010-01 (нижняя строка) [8]</i>			
$1 \cdot 10^2 - 1 \cdot 10^{11}$	± 50	50–3000	Сцинтилляционная спектрометрия, кристалл LaBr ₃ (Ce) Ø38×38 мм или Ø25×25 мм, энергетическое разрешение 3.5% на линии 662 кэВ.
$1 \cdot 10^2 - 1 \cdot 10^8$	± 50	50–3000	Сцинтилляционная спектрометрия, кристалл NaI(Tl) Ø40 × 40 мм, энергетическое разрешение 7.5% на линии 662 кэВ.

Таблица 3. Основные свойства неорганических сцинтилляторов, применяемых в спектрометрии [9–11]

Детектор	NaI (Tl)	LaBr ₃ (Ce)	LaBr ₃ (Ce, Sr)	CeBr ₃
Плотность, г/см ³	3.67	5.08	5.08	5.18
Эффективный атомный номер, Z	51	45.3	45.3	45.9
Энергетическое разрешение на линии 662 кэВ, %	6–7	2.8–3.2	2.2–2.4	4.2–4.3
Постоянная высвечивания, мкс	0.25	0.016	0.025	0.019
Радиационная стойкость, Гр	1–10	>10 ³	>10 ³	>10 ³
Температурный коэффициент амплитуды сигнала, %/°C	0.3	0.01–0.1	0.01–0.1	0.01–0.1
Наличие собственной активности	Нет	¹³⁸ La, ²²⁷ Ac	¹³⁸ La, ²²⁷ Ac	Следы ²²⁷ Ac
Гигроскопичность	Да	Да	Да	Да

ственным недостатком LaBr₃(Ce), LaBr₃(Ce, Sr) является их высокий собственный фон, вызванный радиоактивным распадом трудноотделимых примесей нуклидов ¹³⁸La и ²²⁷Ac (рис. 1а). CeBr₃ обладает на 1–2 порядка меньшим собственным фоном, но также и в 1.5–2 раза худшим энергетическим разрешением.

Критерием для выбора типа кристалла была принята величина скорости счета собственного фона в энергетических интервалах, центры которых

соответствуют энергиям линий нуклидов ИРГ (табл. 1), а ширины равняются удвоенной ширине на половине высоты (2 × ПШПВ) соответствующих линий и определяются исходя из энергетического разрешения СД. Величины собственного фона CeBr₃, LaBr₃(Ce), LaBr₃(Ce, Sr), рассчитывались по данным спектров, приведенных на рис. 16 [11, 12]. Для расчета ширин энергетических интервалов использовали следующие выражения для энергетического разрешения СД:

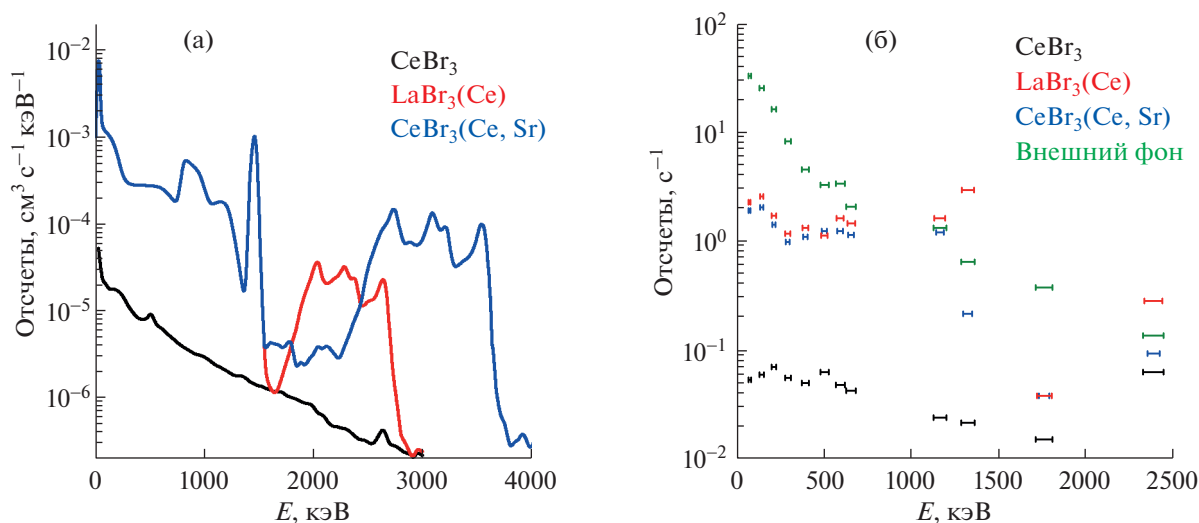


Рис. 1. (а) Спектры собственного фона кристаллов CeBr_3 , $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ и $\text{LaBr}_3(\text{Ce, Sr})$. Для CeBr_3 и $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ приведены данные для кристаллов $\varnothing 51 \times 51$ мм [11], для $\text{LaBr}_3(\text{Ce, Sr})$ в диапазоне <1600 кэВ использован фон $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$, >1600 кэВ собственный фон кристалла $\text{LaBr}_3(\text{Ce, Sr})$ $\varnothing 38 \times 38$ мм [12]. (б) Скорость счета собственного фона CeBr_3 , $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$, $\text{LaBr}_3(\text{Ce, Sr})$ и внешнего фона (для CeBr_3) в энергетических интервалах $2 \times \text{ПШПВ}$ линий ИРГ (табл. 1), рассчитанная для кристаллов $\varnothing 51 \times 51$ мм.

$$\begin{aligned} \text{ПШПВ}(\%) = & \\ & \left(1.9 + \frac{8.7 \times 10^3}{E(\text{кэВ})} \right)^{0.5} \quad \text{CeBr}_3 \text{ [13]} \\ = & \left(1.9 + \frac{5.5 \times 10^3}{E(\text{кэВ})} \right)^{0.5} \quad \text{LaBr}_3(\text{Ce}) \text{ [13]} \\ & \left(0.8 + \frac{3.7 \times 10^3}{E(\text{кэВ})} \right)^{0.5} \quad \text{LaBr}_3(\text{Ce, Sr}) \text{ [12]} \end{aligned} \quad (1)$$

Результаты расчетов для СД размером $\varnothing 51 \times 51$ мм показали, что в диапазоне $0.05\text{--}1.3$ МэВ собственный фон детекторов $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ и $\text{LaBr}_3(\text{Ce, Sr})$ превышает фон CeBr_3 в 20–30 раз (рис. 1б). В грубом приближении чувствительность детектора к излучению линии пропорциональна $1/\sqrt{n_{\text{ф}}}$, где $n_{\text{ф}}$ — скорость счета фона детектора в $2 \times \text{ПШПВ}$ окрестности линии. Учитывая примерно равную эффективность регистрации гамма-излучения рассматриваемых кристаллов и их сопоставимое энергетическое разрешение, можно оценить, что детекторы $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ и $\text{LaBr}_3(\text{Ce, Sr})$ обладают в 4–5 раз худшей по сравнению с CeBr_3 чувствительностью к гамма-линиям ИРГ. Поэтому в качестве СД для регистрирующего блока был выбран кристалл CeBr_3 .

Для оценки вклада внешнего фона в чувствительность СД была также рассчитана скорость счета в $2 \times \text{ПШПВ}$ интервалах от фона, измеренного нами в лаборатории с помощью детектора CeBr_3

и приведенного к размеру кристалла $\varnothing 51 \times 51$ мм (рис. 1б). Видно, что для линий с энергией <2 МэВ вклад внешнего фона на 1–3 порядка превышает вклад собственного фона CeBr_3 . Поэтому для достижения высокой чувствительности СГС требуется обеспечение регистрирующего блока защитой от внешнего фона, например, с помощью свинцового экрана толщиной 10 см.

ВЫБОР КОНСТРУКЦИИ РЕГИСТРИРУЮЩЕГО БЛОКА СГС

Для обеспечения динамического диапазона измеряемых активностей ИРГ от 10^3 до 10^{13} Бк/м³ (10 порядков) требуется использование двух спектрометрических устройств, значительно различающихся по эффективной площади детекторов, либо двух измерительных объемов, различающихся в $10^3\text{--}10^4$ раз. Подобный подход позволяет разделить измеряемый диапазон на два поддиапазона, обеспечивающих приемлемые требования к чувствительности и быстродействию спектрометрических детекторов.

В данной работе предлагается оригинальная конструкция регистрирующего блока СГС, состоящая из двух совмещенных камер, заполняемых измеряемой газовой смесью, и общего спектрометрического детектора (рис. 2а). В качестве детектора используется устройство детектирующее сцинтилляционное (УДС) производства НПЦ “Аспект” с детектором на кристалле CeBr_3 и модулем цифровой обработки сигнала [7]. Боль-

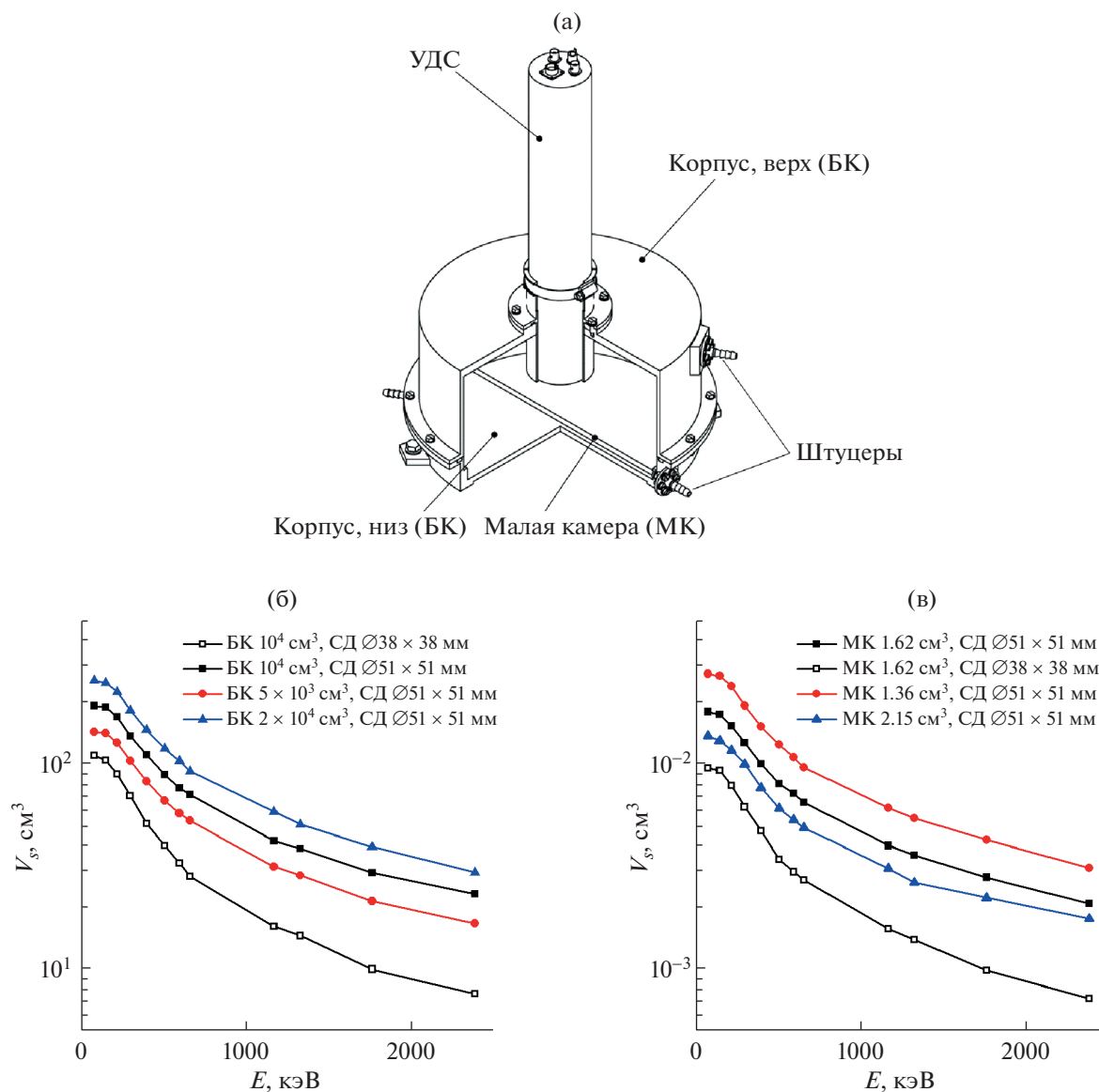


Рис. 2. (а) Конструкция регистрирующего блока СГС: УДС — устройство детектирующее сцинтилляционное, БК — большая камера, МК — малая камера. (б, в) Зависимости эффективного объема (V_s) БК (б) и МК (в) от энергии линейчатого излучения и размера СД для различных объемов камер, полученные по данным моделирования.

шая камера (БК) имеет углубление для установки детектора, обеспечивающее засветку СД с торцевой и боковой сторон (сосуд Маринелли). Объем БК должен обеспечивать регистрацию объемных активностей нуклидов ИРГ в диапазоне от 10^3 до 10^9 Бк/м³. В нижней части БК размещается трубка с внутренним диаметром 2.7 мм, образующая малую камеру (МК), предназначенную для регистрации активности в диапазоне от 10^8 до 10^{13} Бк/м³. Объемы камер изолированы друг от друга, прокачка газа осуществляется через отдельные входные и выходные штуцеры.

Для выбора объема камер и размера СД с помощью программного пакета Geant4 [14] было про-

ведено моделирование чувствительности детектора CeBr_3 к гамма-излучению, продуцируемому в объемах камер. Исследовались характеристики регистрирующего блока в следующих конфигурациях: детектор CeBr_3 размером $\varnothing 38 \times 38$ мм с БК объемом 10^4 см³ и МК — 1.62 см³; детектор CeBr_3 $\varnothing 51 \times 51$ мм с БК объемом 0.5×10^4 , 10^4 , и 2×10^4 см³, объем МК составлял 1.36, 1.62 и 2.15 см³ соответственно. Моделировался отклик детектора на гамма-излучение с энергиями: 81, 150, 220, 300, 400, 511, 600, 662, 1173, 1332, 1768 и 2392 кэВ, продуцируемое изотропно в объемах камер. Полученные спектры энерговыделений в кристалле размывались в соответствии с энергетическим разрешением детек-

тора CeBr_3 согласно формуле 1. Рассчитывался эффективный объем камер (V_S) при регистрации излучения в интервалах $2 \times \text{ПШПВ}$ с помощью следующего выражения:

$$V_S = \frac{N}{N_0} V_0, \quad (2)$$

где N — число частиц, зарегистрированных в детекторе в интервале энергий $2 \times \text{ПШПВ}$ для соответствующей энергии излучения, N_0 — число фотонов, сгенерированных в объеме камеры, V_0 — объем камеры. Полученные результаты представлены на рис. 2б, 2в. Видно, что эффективный объем камер возрастает в 2–3 раза при увеличении размера детектора CeBr_3 от $\varnothing 38 \times 38$ мм до $\varnothing 51 \times 51$ мм. Зависимость V_S от объема большой камеры заметно слабее: при увеличении объема в два раза она возрастает примерно в 1.34 раза для всех энергий. Для малой камеры эффективный объем примерно в 10^4 раз меньше, чем для БК соответствующего объема. При этом V_S МК уменьшается с ростом ее объема, так как с увеличением размеров БК увеличивалось расстояние от трубки МК до СД. В результате анализа полученных результатов и из конструктивных соображений для СГС был выбран детектор CeBr_3 размером $\varnothing 51 \times 51$ мм, объем БК — 10^4 см^3 (10 л), объем МК — 1.62 см^3 .

ХАРАКТЕРИСТИКИ РЕГИСТРИРУЮЩЕГО БЛОКА СГС

Наиболее важными характеристиками регистрирующего блока СГС являются время идентификации линий излучения нуклидов ИРГ, погрешность измерения их объемной активности и динамический диапазон измерений. Погрешность измерения объемной активности изотопа по i -ой линии может быть оценена статистической погрешностью σ_i :

$$\sigma_i = \sqrt{N_i + {}^b n_i T / N_i}, \quad (3)$$

где, N_i — число отсчетов в интервале $2 \times \text{ПШПВ}$ соответствующей линии, зарегистрированное за время измерения T , ${}^b n_i$ — скорость счета фона в том же энергетическом интервале (см. рис. 1б). Если принять $\sigma_i = 0,5$ и решить полученное уравнение относительно N_i , то минимальное число отсчетов в интервале $2 \times \text{ПШПВ}$ соответствующей линии, обеспечивающее погрешность измерения не хуже 50% (${}^{\min} N_i$), будет равняться:

$${}^{\min} N_i = \left(1 + \sqrt{1 + {}^b n_i T}\right) / 0.5. \quad (4)$$

Тогда минимальную объемную активность изотопа, измеряемую СГС по i -ой линии (${}^{\min} A_i$) можно оценить по формуле:

$${}^{\min} A_i = {}^{\min} N_i / (k_i {}^S V_i T), \quad (5)$$

где k_i — выход на распад для соответствующей линии (см. табл. 1), ${}^S V_i$ — эффективный объем камеры для этой же линии (см. рис. 2), T — время измерения.

Верхний предел измерений ограничивается максимальной скоростью счета детектора (${}^{\max} n$), которая определяется его быстродействием, для УДС ${}^{\max} n = 2.5 \cdot 10^5$ имп./с. Тогда верхний предел измеряемой активности изотопа ${}^{\max} A$ можно оценить как:

$${}^{\max} A = {}^{\max} n / \sum k_i {}^S \text{full} V_i, \quad (6)$$

где ${}^S \text{full} V_i$ — эффективный объем для i -ой линии изотопа для полного диапазона измеряемых энергий 50–3000 кэВ, рассчитанный по данным моделирования аналогично ${}^S V_i$, (данные не приведены). Суммирование производится по всем линиям измеряемого изотопа.

Результаты оценки минимальной и максимальной измеряемых активностей ИРГ для обеих камер СГС приведены на рис. 3. Для расчетов использовали БК объемом 10^4 см^3 , соответствующую ей МК объемом 1.62 см^3 , время измерения 500 с, в качестве фона использовали собственный фон кристалла CeBr_3 $\varnothing 51 \times 51$ мм (предполагая подавление естественного фона экранирующим материалом). Из полученных результатов видно, что регистрирующий блок СГС предложенной конструкции в целом удовлетворяет заявленным параметрам. Наиболее значимое исключение составляет изотоп ${}^{85}\text{Kr}$, для которого ${}^{\min} A = 7.5 \cdot 10^4 \text{ Бк/м}^3$ из-за низкого выхода гамма-излучения (0.4%). Поэтому измерение активности данного изотопа следует проводить по сопутствующему β -излучению, к которому детектор СГС также чувствителен. С точки зрения идентификации изотопов наибольшую сложность представляет регистрация близко расположенных линий ${}^{135}\text{Xe}$ — 249.8 кэВ и ${}^{138}\text{Xe}$ — 258.3 кэВ. Для данных изотопов потребуются дополнительная идентификация с использованием второй линии ${}^{138}\text{Xe}$ — 1768.3 кэВ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложена оригинальная конструкция регистрирующего блока спектрометра для измерения объемной активности нуклидов ИРГ, образующихся в результате функционирования ядерных энергетических реакторов. В результате проведенных расчетов были выбраны оптимальные тип и размеры детектора и величины объемов камер, которые совместно обеспечивают измерение объемных активностей нуклидов ИРГ в динамическом диапазоне от 10^3 до 10^{13} Бк/м^3 при длительности времени измерения 500 сек и относительной погрешности не более $\pm 50\%$.

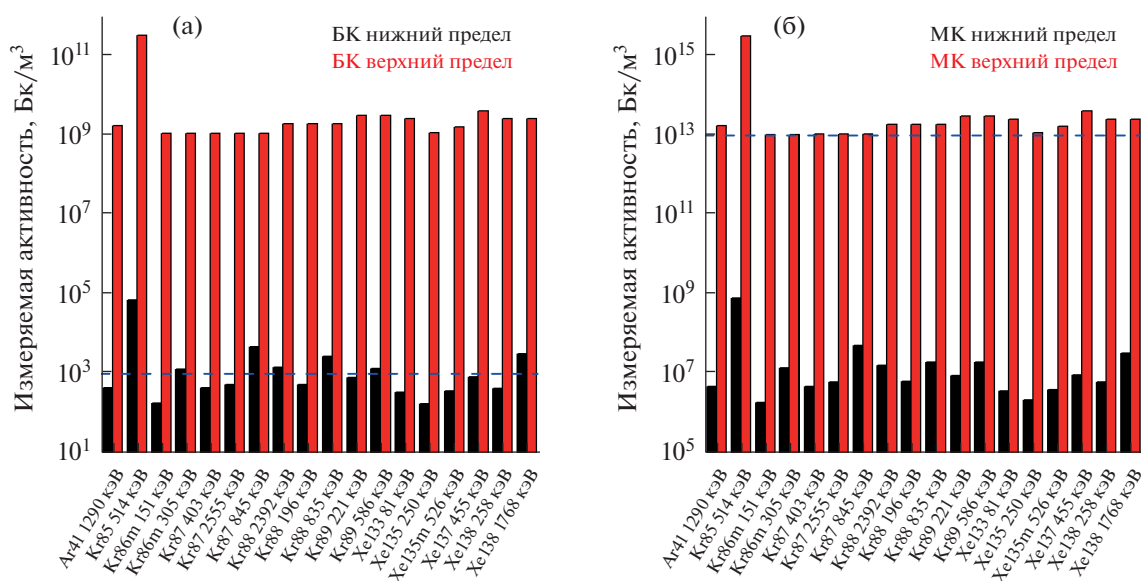


Рис. 3. Оценка минимальной и максимальной измеряемых активностей ИРГ для БК объемом 10^4 см^3 (а) и МК объем 1.62 см^3 (б). Для расчетов использовали характеристики СД $\text{CeBr}_3 \text{ } \varnothing 51 \times 51 \text{ мм}$ и время измерения 500 с. Синий пунктир — требуемая минимальная и максимальная измеряемые активности: 10^3 и 10^{13} Бк/м^3 , соответственно.

Отличительной особенностью регистрирующего блока является размещение двух газовых камер, большой — БК и малой — МК, в единой конструкции и регистрация излучения одним сцинтилляционным спектрометрическим детектором. В качестве детектора предполагается использовать устройство детектирующее сцинтилляционное (УДС) производства НПЦ “Аспект” [7] с сцинтилляционным кристаллом $\text{CeBr}_3 \text{ } \varnothing 51 \times 51 \text{ мм}$. Использование единого детектора обеспечивает общую энергетическую шкалу для двух динамических диапазонов измерений. Конструкционно детектор устанавливается вне объемов газовых камер, что позволяет проводить его калибровку, ремонт или замену без отключения регистрирующего блока от газопроводов, обеспечивающих прокачку газовой смеси через измерительные объемы. Коммутация газовых магистралей позволит проводить как совместные БК + МК, так и отдельные БК или МК измерения в камерах. Для достижения максимальной чувствительности аппаратуры требуется обеспечение регистрирующего блока защитой от внешнего фона с помощью свинцового экрана толщиной 10 см.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарят сотрудников Института астрофизики НИЯУ МИФИ Гляненько А.С., Рубцова И.В. и Суханову Е.Г. за техническую помощь в выполнении работы.

ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работа выполнена при поддержке ИЯФит НИЯУ МИФИ в рамках проекта № 2.1.1.6080.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ/REFERENCES

1. Пиркова А.А., Екидин А.А., Антонов К.Л. // Сб. матер. VI Межд. молод. научн. конф., посв. 70-л. основ. Физико-технологического института УрФУ “Физика. Технологии. Инновации”. Под ред. Иванова В.Ю., Байтимирова Д.Р. 2019. Екатеринбург: УрФУ. С. 279–287.
2. Пишкина М.Д. // Биосферная совместимость: человек, регион, технологии. 2017. № 2 (18). С. 98–107.
3. IAEA-TECDOC-1092/R. Руководство по мониторингу при ядерных или радиационных авариях. Приложение IV. Данные о радионуклидах, табл. IV 3.
4. НП-21-2000. Обращение с газообразными радиоактивными отходами. Требования безопасности.
5. ГОСТ 21496-89. Средства измерения объемной активности радионуклидов в газе. Общие технические требования и методы исследования.
6. Спектрометр для измерения объемной активности гамма-излучающих радионуклидов в газе СГГ-01. Описание типа средств измерений для Государственного реестра, рег. № 41956-09. 2009. <https://all-pribors.ru>.
7. Сцинтилляционные устройства детектирования гамма-излучения УДС-ГК. ЗАО НПЦ “Аспект”. <https://old.aspect-dubna.ru>.

8. Радиометры-спектрометры для контроля объемной активности инертных газов МГГ-010. Приложение к свидетельству № 54136 об утверждении типа средств измерений. 2014. <https://all-pribors.ru>.
9. Юров В.Н., Трофимов Ю.А., Лунарь Е.Э. и др. // Ядерная физика и инжиниринг. 2013. Т. 4 (1). С. 91–96.
10. Lanthanum Bromide Scintillators Performance Summary (Revision: June 2021). Saint-Gobain. <https://luxiumsolutions.com>.
11. Quarati F.G.A., Dorenbos P., van der Biezen J., et al. // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. A. 2013. V. 729. P. 596–604.
12. Hull G., Camera F., Colombi G., et al. // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. A. 2019. V. 925. P. 70–75.
13. Trofimov Yu.A., Kotov Yu.D., Yurov V.N., et al. // J. Phys.: Conf. Ser. 2017. V. 798. P. 012124.
14. Agostinelli S., Allison J., Amako K., et al. // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. A. 2003. V. 506. P. 250–303.

Detection Unit of a Gamma-Ray Spectrometer for Measuring the Volumetric Activity of Noble Radioactive Gases

V. N. Yurov^{1, *}, Yu. A. Trofimov^{1, 2}, and E. E. Lupar¹

¹ National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, 115409 Russia

² Shemyakin–Ovchinnikov Institute of Bioorganic Chemistry, Russian Academy of Science, Moscow, 117871 Russia

*e-mail: VNYurov@mephi.ru

Received January 10, 2024; revised January 10, 2024; accepted January 23, 2024

Abstract—The design and characteristics of the detection unit of a gaseous medium spectrometer for measuring gamma rays from inert radioactive gases, which are formed in nuclear power plant reactors and enter the environment as a part of gas-aerosol emissions, are described. Gamma rays from inert radioactive gases are detected by one scintillation detector based on a $\varnothing 51 \times 51$ -mm CeBr₃ crystal in two 10⁴- and 2-cm³ chambers. The energy range of the spectrometer is 0.05–3.0 MeV. Switching of gas inputs and outputs allows both simultaneous and alternate measurements in both chambers, which ensures the calculated dynamic range of measured inert radioactive gas activities from 10³ to 10¹³ Bq/m³ with a relative measurement error of 50% in the nuclide emission lines for time intervals from 1 to 500 s, depending on the activity.

Keywords: noble radioactive gases, gamma rays, gaseous medium spectrometer, CeBr₃ scintillation crystal