

На правах рукописи

ПЬЯ СОН НЬЕН

**МЕТОД ХАРАКТЕРИЗАЦИИ РАДИОАКТИВНЫХ ОТХОДОВ С
ПОМОЩЬЮ КСЕНОНОВОГО ГАММА-СПЕКТРОМЕТРА**

01.04.01 – Приборы и методы экспериментальной физики

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени кандидата
физико-математических наук

Автор:



Москва – 2015

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ» (НИЯУ МИФИ)

Научный руководитель:

Грачев Виктор Михайлович
кандидат физико-математических наук, доцент,
НИЯУ МИФИ, г. Москва

Официальные оппоненты:

Шаманин Игорь Владимирович
доктор физико-математических наук, профессор,
Национальный исследовательский Томский
политехнический университет, г. Томск,
заведующий кафедрой технической физики.

Сучков Сергей Иванович
кандидат физико-математических наук,
Физический институт им. П.Н.Лебедева РАН, г. Москва
старший научный сотрудник

Ведущая организация:

Институт проблем безопасного развития атомной энергетики РАН (ИБРАЭ)

Защита состоится «18» ноября 2015 г. в 17 час. 00 мин. На заседании диссертационного совета Д 212.130.07 на базе НИЯУ МИФИ по адресу: 115409, Москва, Каширское шоссе, 31, тел. (499) 324-84-98.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке НИЯУ МИФИ и на сайте <http://ods.mephi.ru/>.

Автореферат разослан «___» сентября 2015 г.

Просим принять участие в работе совета или прислать отзыв в двух экземплярах, заверенных печатью организации, по адресу НИЯУ МИФИ.

Ученый секретарь диссертационного совета
д.ф.-м.н., профессор



С.Е. Улин

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. Важной проблемой контроля и хранения радиоактивных отходов является определение их изотопного и количественного состава.

Характеризация радиоактивных отходов (РАО) это определение их радиоизотопного состава и активности изотопов с целью выяснения необходимости их дальнейшей коррекции, обработки или пригодности к дальнейшей переработке, хранению или захоронению.

Для характеристики больших объемов РАО различных типов, образующихся при демонтаже промышленных уран-графитовых реакторов и других ядерно- и радиационно-опасных объектов, необходимо использование экспрессных неразрушающих методов контроля на базе гамма-спектрометров, обладающих большой чувствительностью и высоким энергетическим разрешением регистрации. Кроме того, они должны обеспечивать надежное обнаружение и идентификацию РАО, а также обладать радиационной стойкостью и температурной стабильностью, т.е. высокой эксплуатационной надежностью. Поэтому разработка и создание новых типов спектрометрических приборов и методов характеристики на их основе представляются весьма сложной и актуальной задачей. В связи с этим в радиационной лаборатории НИЯУ МИФИ были проведены исследования при помощи гамма-спектрометров на основе сжатого ксенона с рабочим объемом 0,2 и 6 литров для решения задач идентификации и характеристики РАО.

Цель работы.

Целью данной диссертационной работы является разработка метода для определения нуклидного состава отходов, измерения удельной и общей активности радионуклидов, находящихся в специальных контейнерах, с использованием ксенонового гамма-спектрометра.

Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи:

1. Исследование спектрометрических характеристик и возможностей ксенонового гамма-спектрометра (КГС).
2. Разработка модели КГС для решения задач характеристики РАО и расчет основных параметров измерительного комплекса методом Монте-Карло.
3. Разработка метода определения активности изотопов, входящих в состав содержимого контейнера с РАО.
4. Разработка метода измерения гамма-спектров от различных образцов промышленных РАО с помощью КГС.
5. Разработка метода обработки и анализа результатов измерения активности изотопов, содержащихся в контейнерах с РАО.
6. Разработка метода определения концентрации радионуклида ^{152}Eu в смеси с ^{60}Co и ^{137}Cs .

Научная новизна

- Впервые разработан метод характеристики радиоактивных отходов с использованием ксенонового гамма-спектрометра, позволяющий с высокой степенью надежности идентифицировать радионуклидный состав и определять активность изотопов с точностью, удовлетворяющей требованиям характеристики РАО.
- Разработана и создана виртуальная модель установки на базе ксенонового гамма-спектрометра для характеристики радиоактивных отходов по гамма-излучению, учитывающая геометрию измерения гамма-спектров, особенности упаковки РАО и ослабление потока гамма-квантов материалом, содержащимся в контейнере и его стенках.

Практическая значимость работы заключается в том, что на основе приведенных в диссертации результатов экспериментальных исследований продемонстрирована возможность использования ксеноновых гамма-спектрометров на предприятиях промышленности, занимающихся сортировкой и хранением РАО для их характеристики.

Основные положения, выносимые на защиту.

1. Экспериментальные результаты исследования спектрометрических характеристик КГС с объемами 0,2 и 6 литров.
2. Результаты математического моделирования эффективности регистрации гамма-квантов КГС для проведения характеристики РАО.
3. Экспериментальные результаты измерения энергетических спектров гамма-излучения РАО, содержащихся в контейнерах.
4. Результаты определения удельной активности РАО, в специализированных контейнерах и пороги обнаружения концентрации ^{152}Eu в смеси с ^{60}Co и ^{137}Cs .

Достоверность

Достоверность результатов подтверждается хорошим согласием расчетов и экспериментов с паспортными данными радиоактивных источников ОСГИ. Различие результатов по определению активности не превышает 5%, что значительно лучше, чем требуется (погрешность 50%) для характеристики РАО.

Личный вклад автора

- Разработал метод определения активности изотопов, входящих в состав содержимого контейнера, с применением экспериментально измеренных гамма-спектров и результатов моделирования процесса характеристизация методом Монте-Карло.
- Провел на основе экспериментальных данных анализ спектрометрических характеристик и возможностей гамма-спектрометрической установки на базе КГС.
- Разработал и применил программу для моделирования КГС и расчета основных параметров измерительной установки методом Монте-Карло.
- Провел измерения и обработку гамма-спектров изотопов от стандартного контейнера для твердых радиоактивных отходов.
- Определил порог обнаружения концентрации радионуклида ^{152}Eu в радиоактивных отходах, содержащих смеси с ^{60}Co и ^{137}Cs .

Объем и структура работы.

Диссертация состоит из введения, пяти разделов, выводов и библиографии. Работа изложена на 103 страницах, содержит 45 рисунков, 13 таблиц и список цитируемой литературы из 41 наименования.

Апробация работы.

Основные положения работы докладывались и обсуждались на следующих научных семинарах, совещаниях и конференциях: LXIII International Conference NUCLEUS 2013 «Fundamental Problems Of Physics And Atomic Power Engineering, Book Of Abstracts», (Saint-Petersburg, October 2013), XXIV International Symposium on Nuclear Electronic & Computing (Bulgaria, November 2013), Научные сессии НИЯУ МИФИ-2014 и НИЯУ МИФИ-2015 (г. Москва, февраль 2014 и 2015 гг.); II и III международные молодежные научные школы-конференции «Современные проблемы физики и технологий» (г. Москва, апрель 2013 и 2014 гг.).

Публикации.

Основные положения диссертации изложены в 12 работах: 5 статей в рецензируемых журналах, две из которых включены в базы данных Web of Science и Scopus, три включены в базу данных РИНЦ; 7 работ опубликованы в виде тезисов международных и всероссийских конференций. Три статьи напечатаны в журналах, входящих в перечень ВАК РФ.

Объем и структура работы.

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы из 41 наименований, содержит 103 страниц, в том числе 45 рисунков и 13 таблиц.

СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ.

Во введении к диссертации обосновываются актуальность и научная новизна работы, указываются ее цели, рассматриваются научная и практическая ценность работы и формулируются основные положения, выносимые автором на защиту.

В первой главе диссертационной работы представлен литературный обзор, раскрывающий проблему контроля и хранения радиоактивных отходов. Представлена классификация РАО по различным критериям: активности, агрегатному состоянию, времени распада и радионуклидному составу. Показывается классификация жидких и твердых радиоактивных отходов по удельной радиоактивности. Даны рекомендации для предварительной сортировки твердых РАО по уровню радиоактивного загрязнения. Приведен краткий обзор радиоактивных отходов, образующихся в процессе эксплуатации АЭС.

Во второй главе представлен обзор современных гамма-спектрометров, используемых для характеристики радиоактивных материалов. Для надежной идентификации РАО необходимо использовать гамма-спектрометры, обладающие хорошим энергетическим разрешением и высокой чувствительностью. Показаны достоинства и недостатки различных типов гамма-спектрометров: на основе сцинтилляционных гамма-спектрометров и полупроводниковых детекторов.

Сцинтилляционные гамма-спектрометры на основе кристаллов NaI(Tl) наиболее широко применяются в гамма-спектрометрии. Эти детекторы, имея достаточно высокую плотность ($3\text{--}6\text{ г/см}^3$), обеспечивают высокую чувствительность. Однако их энергетическое разрешение сравнительно невысокое – обычно (9–10 %) для гамма-линии 662 кэВ, при этом оно существенно зависит от размеров кристалла. Имеется также сильная зависимость их энергетического разрешения от температуры – оно ухудшается с ростом температуры.

Детекторы на основе лантана: $\text{LaCl}_3:\text{Ce}$ отличаются хорошим энергетическим разрешением (3-5) %, значительным световыходом, коротким временем высвечивания, достаточно высокой плотностью ($3,9 \text{ г/см}^3$) и большим атомным номером ($Z=57$). К недостаткам лантановых кристаллов следует отнести наличие фонового гамма-излучения $1,6 \text{ Бк/см}^3$ от естественного радиоактивного изотопа ^{138}La (его содержание в природном лантане составляет около 0,09 %), а также образование в измеряемых спектрах пиков от α -частиц, создаваемых изотопом ^{227}Ac , который обычно содержится в лантановых кристаллах как сопутствующий элемент. Все это заметно усложняет регистрацию исследуемого гамма-излучения.

Среди современных спектрометрических гамма-детекторов рекордсменами, с точки зрения энергетического разрешения, являются полупроводниковые детекторы, изготовленные на основе сверхчистого германия (HPGe). Они обеспечивают энергетическое разрешение около $\sim 1 \text{ кэВ}$ для гамма-линии 662 кэВ . Эти детекторы имеют высокую плотность — $5,33 \text{ г/см}^3$, что обеспечивает их большую эффективность регистрации гамма-квантов. Сегодня освоена технология выращивания этих кристаллов достаточно больших размеров — несколько сотен см^3 .

Основным недостатком HPGe гамма-детекторов является то обстоятельство, что они работают при криогенных температурах и для их функционирования необходимо использовать жидкий азот или электрические системы охлаждения, что существенно увеличивает стоимость этих детекторов, а также усложняет их обслуживание. Именно по этой причине эти гамма-детекторы, в основном, применяются в лабораторных условиях, где имеется возможность обеспечить надежную поставку жидкого азота, как наиболее экономичного и эффективного охладителя.

В третьей главе представлены результаты измерений спектрометрических характеристик ксеноновых гамма-спектрометров (КГС). Исследованы возможности КГС с рабочим объемом 0,2 литра для характеристики радиоактивных отходов по гамма-излучению радионуклидов.

Проведены его лабораторные испытания с применением радиоактивных источников из набора образцовых спектрометрических гамма-источников и определены его спектрометрические характеристики. Энергетическое разрешение КГС составило $2,2 \pm 0,1\%$ для энергии гамма-квантов 662 кэВ, что в 2-3 раза лучше, чем энергетическое разрешение сцинтилляционного детектора NaI(Tl). Анализ характеристик нелинейности показал, что отклонение измеренных значений от линейности не превышает 1% во всем рабочем энергетическом диапазоне, т.е. можно сказать, что КГС с объемом 0,2 литра имеет хорошую линейность. Зависимость эффективности регистрации ксенонового гамма-спектрометра от энергии гамма-квантов представлена на рис 1.

Для уменьшения времени, затрачиваемого на измерения во время характеристики РАО, создан новый прибор КГС с объемом 6 литров. Определены реальные спектрометрические характеристики КГС с использованием радиоактивных источников из набора образцовых спектрометрических гамма-источников. Энергетическое разрешение КГС с объемом 6 литров составляет $2,8 \pm 0,1\%$ для энергии гамма-квантов $E=662$ кэВ, что в 2-3 раза лучше, чем энергетическое разрешение у сцинтилляционных детекторов. Отклонение измеренных значений от линейности не превышает 0,5% во всем рабочем энергетическом диапазоне, что демонстрирует высокую линейность КГС с объемом 6 литров. На рис 2 представлена зависимость эффективность регистрации КГС от энергии гамма-квантов.

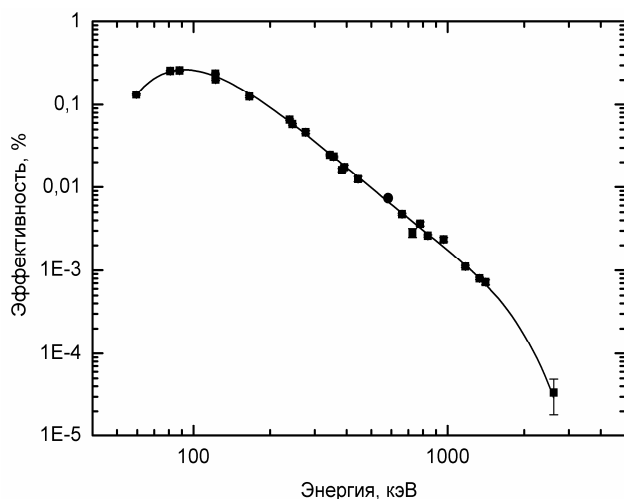


Рис. 1- Зависимость эффективности регистрации КГС 0,2 литра от энергии гамма-квантов.

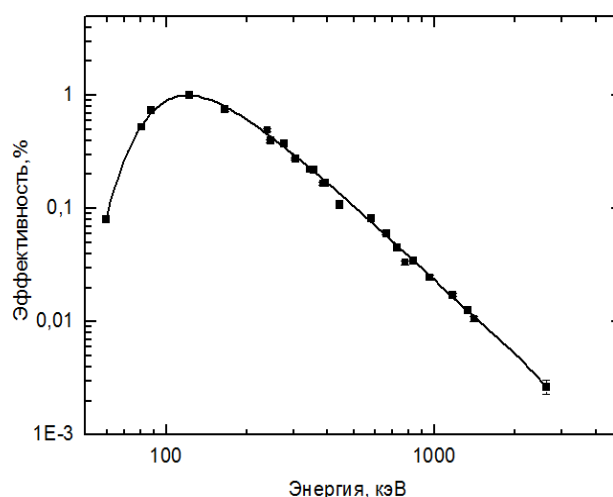


Рис. 2- Зависимость эффективности регистрации КГС 6 литров от энергии гамма-квантов.

Результаты показывают, что КГС с объемом 0,2 литра обладают эффективностью регистрации $4,7 \times 10^{-3} \%$, КГС с объемом 6 литров – $8,4 \times 10^{-2} \%$ для энергии гамма-квантов $E=662$ кэВ.

В четвертой главе приводятся результаты моделирования гамма-спектрометра на основе сжатого ксенона для решения задач характеристики РАО в реальных условиях измерений. Проводились численные расчеты методом Монте-Карло с применением пакета программ GEANT4.

Представлено описание написанной на языке С++ программы, которая учитывает совокупность факторов для корректного моделирования ксенонового гамма-спектрометра: его конструкция, энергетическое разрешение прибора, геометрия эксперимента и др. В конструкции гамма-спектрометра, которая закладывалась в модель, учитывались основные элементы спектрометра: корпус ионизационной камеры с размерами, соответствующими реальному гамма-детектору, титановый анод, керамические элементы внутри ионизационной камеры, алюминиевый корпус. Блок-схема программы моделирования КГС представлена на рисунке 3.

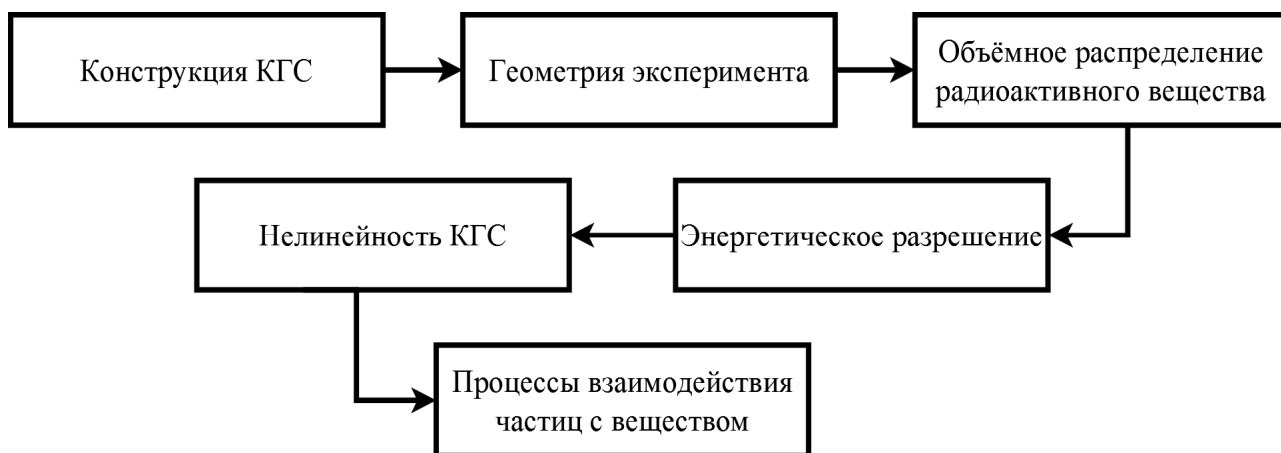


Рис. 3- Блок-схема моделирования КГС.

Для описания взаимодействия гамма-квантов с веществом используются основные эффекты, характерные для частиц с энергией менее 10 МэВ: фотоэффект, эффект Комптона, рождение электрон-позитронной пары.

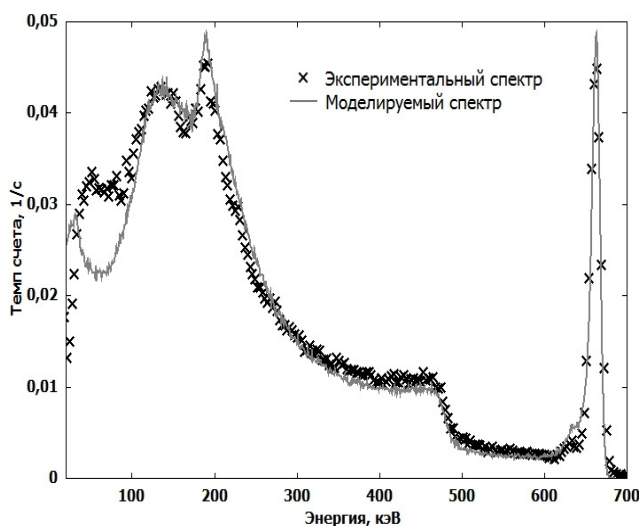


Рис. 4- Экспериментальный и моделируемый спектр для источника ^{137}Cs .

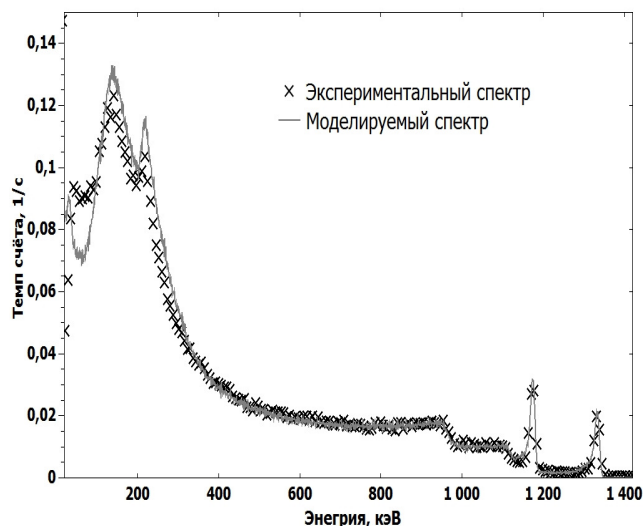


Рис. 5- Экспериментальный и моделируемый спектр для источника ^{60}Co .

Для проверки корректности модели КГС проводился сравнительный анализ моделируемых и экспериментальных спектров. Из рисунков 4 и 5 видно, что форма пиков в моделируемых спектрах от источников ^{137}Cs и ^{60}Co хорошо согласуется с экспериментальными результатами. Присутствует некоторое отклонение в области комптоновского плато, обусловленное рассеянием гамма-квантов на окружающем спектрометр веществе.

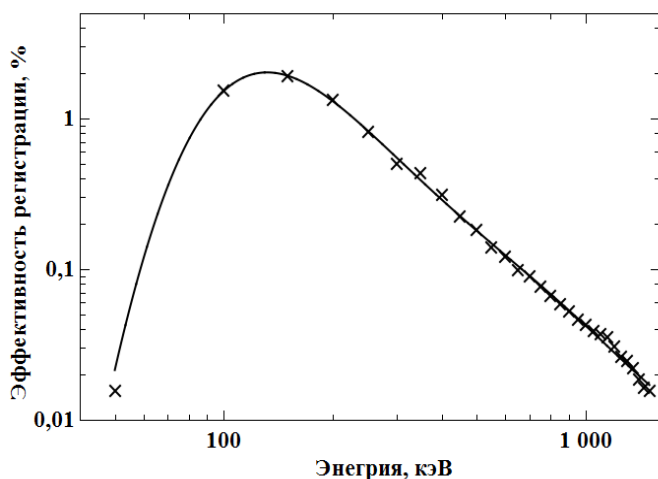
Табл.1- Сравнение темпов счета при наборе экспериментального и моделируемого спектров для γ -линий ^{137}Cs и ^{60}Co .

Спектр	Эксперимент ^{137}Cs	Моделируемый ^{137}Cs	Эксперимент ^{60}Co	Моделируемый ^{60}Co
Общий темп счета в спектре, с^{-1}	$12,3 \pm 0,6$	$11,9 \pm 0,6$	43 ± 2	44 ± 2
Темп счета в области пиков, с^{-1}	$0,8 \pm 0,04$	$0,77 \pm 0,04$	$0,64 \pm 0,03$	$0,63 \pm 0,03$
			$0,42 \pm 0,02$	$0,40 \pm 0,02$

Расхождение в темпах счета между экспериментальным и моделируемым спектрами, представленные в таблице 1, составляет около 5 % по всей площади спектра, в том числе и для пика полного поглощения. Полученные результаты в рамках 5 % погрешности согласуются с активностью источников ОСГИ.

Одной из важнейших характеристик ксенонового гамма-спектрометра является эффективность регистрации гамма-квантов. Эта характеристика зависит от параметров рабочего вещества, энергии гамма-квантов и геометрии конструкции детектора. Для оценки активности радиоактивных источников необходимо знать эффективность регистрации в пике полного поглощения гамма-квантов в зависимости от энергии частиц.

Для оценки параметров моделируемых КГС определены эффективности регистрации гамма-квантов по пику полного поглощения. Для их нахождения были получены спектры от точечных моноэнергетичных гамма-источников с энергиями от 100 до 1500 кэВ с шагом 50 кэВ. Предполагалось, что источники находятся на расстоянии 20 см от гамма-спектрометра. На рисунке 6 представлена эффективность регистрации КГС, рассчитанная методом Монте-Карло.



*Рис. 6- Моделируемая
эффективность регистрации
гамма-квантов для КГС с объемом
6 л.*

Полученная зависимость эффективности регистрации гамма-квантов имеет те же особенности, что и экспериментальные результаты, в частности, максимум в области энергии 122 кэВ.

В пятой главе представлены результаты характеристики различных образцов РАО с помощью КГС.

Приведена оценка активности исследуемых образцов. Осуществлен численный расчет гамма-спектров методом Монте-Карло от содержимого изучаемого контейнера, проведена оценка его удельной активности.

С помощью КГС объемом 0,2 литра исследовались три образца РАО, которые представляли собой три различные пробы из системы сбора радиоактивных отходов. Каждая проба была помещена в стеклянный флакон. Спектры гамма-излучения от образцов представлены на рисунках 5 – 7.

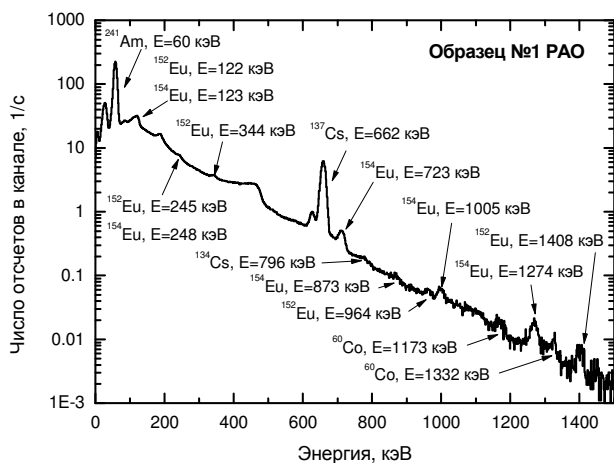


Рис. 5- Спектр гамма-излучения образца №1 РАО, измеренный КГС с объемом 0,2 литра.

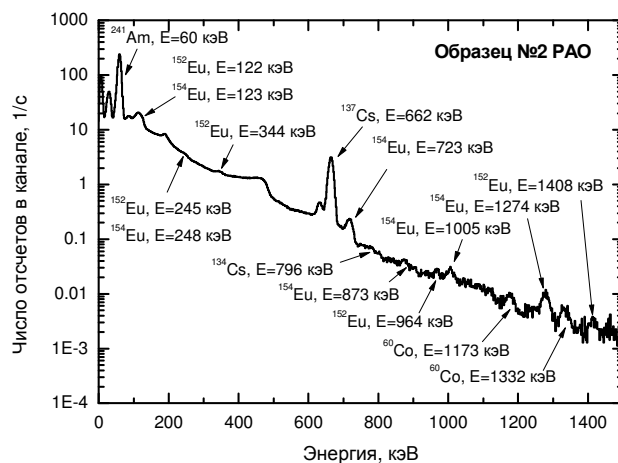


Рис. 6- Спектр гамма-излучения образца №2 РАО, измеренный КГС с объемом 0,2 литра.

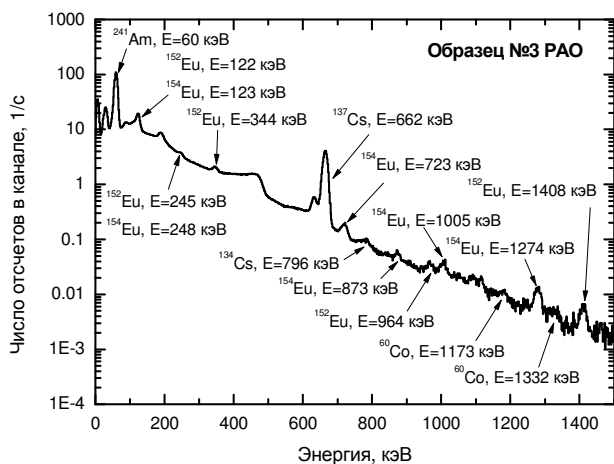


Рис. 7- Спектр гамма-излучения образца №3 РАО, измеренный КГС с объемом 0,2 литра.

На рисунках видны гамма-линии от различных радиоактивных изотопов. Обнаружив гамма-линию и определив энергию гамма-квантов, можно идентифицировать радионуклид. Анализ гамма-спектров, измеренных КГС с объемом 0,2 литра, показывает наличие в образцах №1-№3 РАО изотопов ^{241}Am , ^{134}Cs , ^{137}Cs , ^{152}Eu , ^{154}Eu и ^{60}Co .

В результате обработки гамма-спектров были получены активности обнаруженных в образцах РАО изотопов. Расчетные значения активностей изотопов в образцах №1-№3 РАО представлены в таблице 2.

Таблица 2- Активности изотопов, идентифицированных в образцах радиоактивных отходов.

ИЗОТОП	Активность, Бк		
	ОБРАЗЕЦ №1 РАО	ОБРАЗЕЦ №2 РАО	ОБРАЗЕЦ №3 РАО
^{241}Am	$(1,09\pm 0,03)\times 10^7$	$(1,24\pm 0,04)\times 10^7$	$(5,29\pm 0,16)\times 10^6$
^{137}Cs	$(5,59\pm 0,22)\times 10^6$	$(2,85\pm 0,11)\times 10^6$	$(3,67\pm 0,15)\times 10^6$
^{152}Eu	$(3,11\pm 0,22)\times 10^5$	$(2,33\pm 0,16)\times 10^5$	$(2,58\pm 0,18)\times 10^5$
^{154}Eu	$(3,17\pm 0,25)\times 10^5$	$(2,31\pm 0,18)\times 10^5$	$(4,04\pm 0,32)\times 10^5$
^{60}Co	$(3,24\pm 0,31)\times 10^4$	$(2,83\pm 0,27)\times 10^4$	$(3,16\pm 0,31)\times 10^4$
^{134}Cs	$(7,03\pm 0,71)\times 10^3$	$(4,21\pm 0,42)\times 10^3$	$(5,03\pm 0,51)\times 10^3$

Результаты измерения образцов РАО ксеноновым гамма-детектором с рабочим объемом 0,2 литра позволяют сделать вывод о том, что его можно использовать для характеристики радиоактивных отходов по гамма-излучению радионуклидов.

Объектом исследований для КГС с объемом 6 литров был контейнер размерами $215\times 215\times 77\text{ см}^3$ и массой 1300 кг. Толщина стальной стенки 8 мм. Контейнер был наполнен сталью в виде кусков различной формы, загрязненной радионуклидами ^{137}Cs и ^{60}Co . На рисунках 8 и 9 представлены спектры РАО от контейнера, измеренные с использованием КГС с объемом 6 литров.

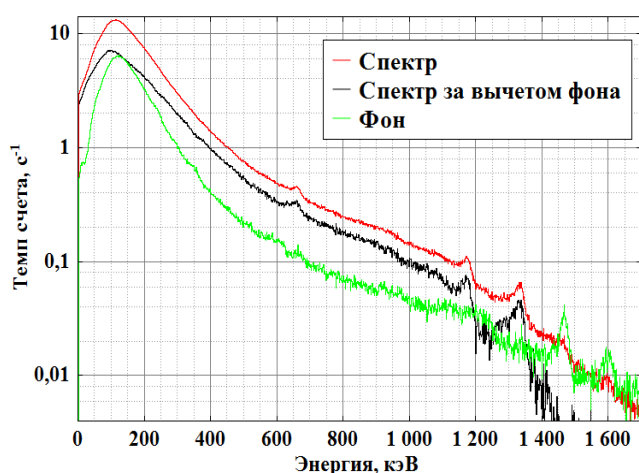


Рис 8- Фоновый и гамма-спектр от контейнера

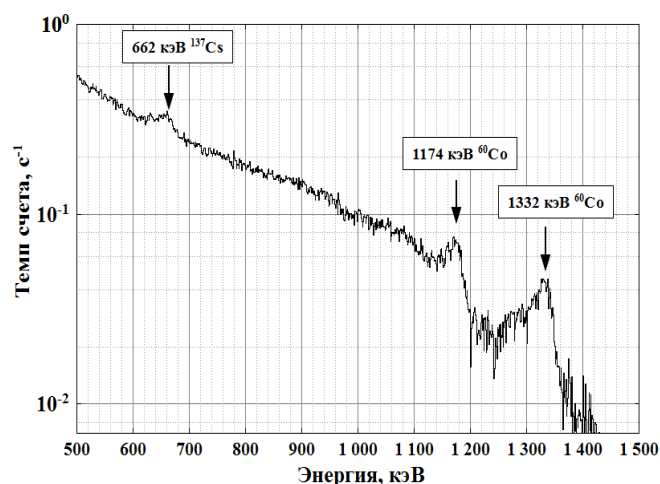


Рис. 9- Гамма-линии ^{137}Cs и ^{60}Co в энергетическом спектре за вычетом фона.

Из рис. 8 видно, что детектор регистрирует пики ^{137}Cs и ^{60}Co . Для определения активности содержимого контейнера необходимо проанализировать данные пики.

Для определения активности изотопов содержимого контейнера был разработан метод расчета активности РАО с учетом данных экспериментальных измерений и моделируемых спектров. Для того, чтобы получить корректные значения активности радиоактивного содержимого контейнера, было проведено моделирование эксперимента по регистрации гамма-излучения в условиях соответствующих экспериментальным измерениям контейнера с РАО. Делалось предположение, что активность моделируемого источника (^{137}Cs) имеет равномерный по объему и изотропный характер. Количество гамма-квантов, испущенных источником, соответствовало суммарной активности контейнера 400 МБк, что составляет объемной активности 116,5 кБк/дм³. Суммарный темп счета в моделируемом спектре равняется 265 с⁻¹ под пиком 662 кэВ, 90 с⁻¹ под пиком 1174 кэВ и 85 с⁻¹ под пиком 1332 кэВ. Вычисление активности изотопа РАО проводилось по формуле:

$$A_{\text{эксперимент}} = A_{\text{модель}} \frac{\sum_j^n S_j^{\text{эксперимент}}}{\sum_j^n S_j^{\text{модель}}}$$

$A_{\text{эксперимент}}$ - экспериментальная активность радионуклида в источнике;

$S_{\text{эксперимент}}$ - экспериментальная площадь в пике полного поглощения;

$S_{\text{модель}}$ - моделируемая площадь в пике полного поглощения;

$A_{\text{модель}}$ - моделируемая активность радионуклида;

В таблице 3 представлена вычисленные активности РАО в контейнере.

Таблица 3- Расчет активности контейнера с РАО

Изотоп	^{137}Cs	^{60}Co	
Энергия линии, кэВ	662	1174	1332
Интенсивность экспериментального пика, с^{-1}	$1,50 \pm 0,05$	$1,18 \pm 0,04$	$0,88 \pm 0,04$
Интенсивность моделируемого пика, с^{-1}	265	90	85
Активность моделируемая, МБк	400	400	
Расчетная активность изотопа в контейнере, МБк	$2,3 \pm 1,3$	$4,7 \pm 1,6$	
Расчетная удельная активность изотопа в контейнере, кБк/кг	$1,8 \pm 1,0$	$3,6 \pm 1,2$	

В результате суммарная удельная активность содержимого контейнера составила 7 ± 2 МБк, что соответствует удельной активности равной $5,4 \pm 1,6$ кБк/кг. Данный уровень активности контейнера позволил классифицировать его как содержащий низкоактивные РАО.

Во второй половине главы с целью определения пороговой концентрации, необходимой для обнаружения изотопа ^{152}Eu в смеси с ^{60}Co и ^{137}Cs проводилось моделирование гамма-спектров. Актуальность определения изотопа ^{152}Eu в РАО объясняется тем, что данный радионуклид содержится в отходах реакторного производства и по соотношению концентраций радионуклидов ^{60}Co и ^{152}Eu можно судить о возрасте данной смеси, если известны начальные концентрации.

Определялся уровень значимости линии 344 кэВ (одна из наиболее интенсивных линий ^{152}Eu) в гамма-спектре.

$$S = \frac{I}{\sigma_{\text{фон}}}, \text{ где}$$

I — площадь пика за вычетом фона;

$\sigma_{\text{фон}}$ — флуктуация фона в области пика определялась как статистическая флуктуация событий в бинах гистограммы по формуле $\sigma_{\text{фон}} = \sqrt{I_{\text{фон}}}$, где $I_{\text{фон}}$ — площадь фона под пиком.

На рис 10 и 11 представлены графики зависимостей уровня значимости пика 344 кэВ изотопа ^{152}Eu для различных составов смеси.

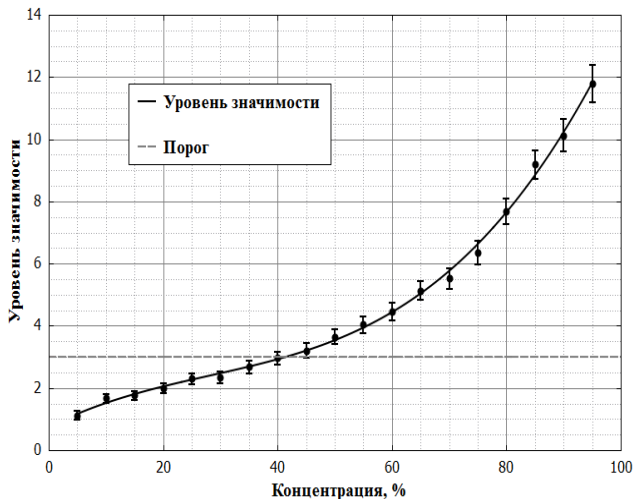


Рис. 10- Зависимость уровня значимости пика от концентрации ^{152}Eu в смеси ^{60}Co .

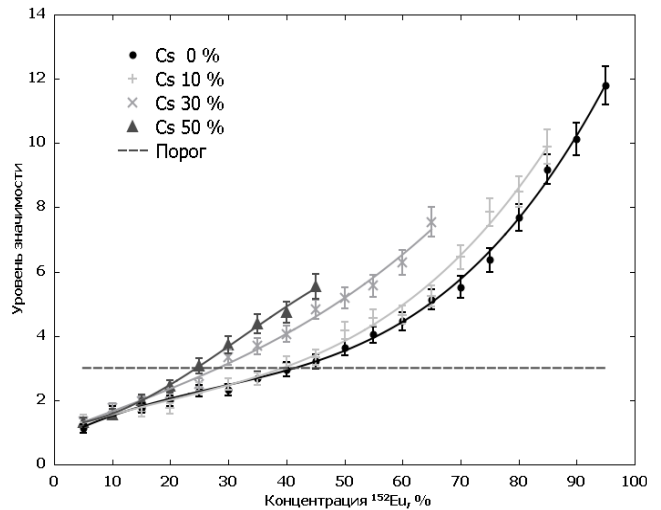


Рис.11 - Зависимость уровня значимости пика от концентрации ^{152}Eu и ^{137}Cs .

Для радиоактивной смеси, в состав которой входит ^{152}Eu , ^{137}Cs и ^{60}Co , обработка показала, что КГС способен обнаружить ^{152}Eu при его концентрации в смеси более 40%.

ВЫВОДЫ

В результате выполнения данной работы проведены исследования характеристик гамма-спектрометров на основе сжатого ксенона с целью демонстрации возможности создания на их основе метода характеристики радиоактивных отходов.

1. Впервые разработан метод для определения активности изотопов РАО при помощи ксенонового гамма-спектрометра большего объема (6 литров)

с применением комбинированных данных экспериментальных измерений и моделируемых спектров данных.

2. Проведены исследования КГС с использованием радиоактивных источников из набора ОСГИ и определены его спектрометрические характеристики. Показано, что энергетическое разрешение ксеноновых гамма-спектрометров составило $\sim 2\%$ для энергии гамма-квантов 662 кэВ, что в 2-3 раза лучше, чем энергетическое разрешение сцинтилляционного детекторов.

3. Создана модель КГС для численных расчетов гамма-спектров методом Монте-Карло. Проведенное сравнение экспериментальных и моделируемых спектров позволяет сделать вывод о возможности применения данного подхода для получения спектров от источников сложной геометрической формы.

4. Проведены измерения на реальных образцах РАО с помощью КГС с рабочим объемом 0,2 литра и сделано заключение о спектрометрических возможностях КГС для характеристики радиоактивных отходов по гамма-излучению радионуклидов.

5. Разработан и применен метод измерения РАО, находящихся в контейнере, с помощью КГС с рабочим объемом 6 литров. Результаты позволяют сделать вывод о способности КГС идентифицировать РАО по гамма-излучению радионуклидов. Определена активность РАО, находящихся в контейнере: суммарная активность содержимого контейнера составила 7 ± 2 МБк, что соответствует удельной активности равной $5,4 \pm 1,6$ кБк/кг.

6. Разработан метод определения минимальной концентрации радионуклида ^{152}Eu для идентификации в смеси РАО с ^{60}Co и ^{137}Cs . Проведены расчеты, показывающие, что КГС способен обнаружить ^{152}Eu при концентрации этого изотопа более 40%.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. С.Н. Пья, К.Ф. Власик, В.М. Грачев, В.В. Дмитренко, А.С. Новиков, А.Е. Шустов, Д.В. Петренко, С.Е. Улин, З.М. Утешев, И.В. Чернышева. Идентификация и паспортизация радиоактивных материалов и отходов с помощью ксенонового гамма-детектора. – В сб.: Тезисы докладов II международная молодежная научная школа-конференция «Современные проблемы физики и технологий», 2013, с. 41–42.
2. Shustov A.E., Chernysheva I.V., Dmitrenko V.V., Grachev V.M., Novikov A.S., Pyae S.N., Vlasik K.F., Ulin S.E., Uteshev Z.M. Xenon gamma-rays detector`s matrix of response functions for deconvolution of original spectrum. – В сб.: аннотация докладов XXIV International Symposium on Nuclear Electronics and Computing, 2013, p. 37-38.
3. Shustov A.E., Chernysheva I.V., Dmitrenko V.V., Grachev V.M., Novikov A.S., Pyae S.N., Vlasik K.F., Ulin S.E., Uteshev Z.M. Original Spectrum Deconvolution of Radioactive Sources Irradiating Gamma-Ray Detectors Based on High Pressed Xenon. В сб.: аннотация докладов LXIII International Conference NUCLEUS 2013 « Fundamental Problems Of Physics And Atomic Power Engineering », Saint-Petersburg, 2013, p 235.
4. Shustov A.E., Chernysheva I.V., Dmitrenko V.V., Grachev V.M., Novikov A.S., Pyae S.N., Vlasik K.F., Ulin S.E., Uteshev Z.M. Xenon gamma-rays detector`s matrix of response functions for deconvolution of original spectrum. – В сб.: тезисы докладов Proc. of XXIV International. Symposium. On Nuclear Electronics& Computing, Bulgaria, 2013, p. 226-229.
5. А.Е. Шустов, К.Ф. Власик, В.М. Грачев, В.В. Дмитренко, А.С. Новиков, С.Н. Пья, С.Е. Улин, З.М. Утешев, И.В. Чернышева. Восстановление спектров гамма источников, регистрируемых ксеноновым гамма детектором – Ядерная физика и инжиниринг, 2013, т. 4, № 12, с. 1–7 (журнал выключен перечень ВАК РФ, в базу данных РИНЦ).
6. Pyae S.N., Vlasik K.F., Grachev V.M., Dmitrenko V.V., Novikov A.S., Petrenko D.V., Shustov A.E., Uteshev Z.M., Ulin S.E., Chernysheva I.V. Simulation

of the xenon gamma spectrometer for analyzing radioactive materials. Bulletin of the Lebedev Physics Institute, 2014, Vol. 41, Issue 9, pp. 247-251 (журнал включен в перечень ВАК РФ и входит в базы данных Web of Science и Scopus), DOI: 10.3103/S1068335614090024.

7. А.Е. Шустов, К.Ф. Власик, В.М. Грачев, В.В. Дмитренко, А.С. Новиков, С.Н. Пья, Д.В. Петренко, С.Е. Улин, З.М. Утешев, И.В. Чернышева. Матрица приборных функций ксенонового гамма-детектора. – Вестник национального исследовательского ядерного университета “МИФИ”, 2014, т. 3, № 1, с. 1–5 (журнал включен в перечень ВАК РФ, в базу данных РИНЦ).

8. С.Н. Пья, К.Ф. Власик, В.М. Грачев, В.В. Дмитренко, А.С. Новиков, А.Е. Шустов, Д.В. Петренко, С.Е. Улин, З.М. Утешев, И.В. Чернышева. Моделирование ксенонового гамма-спектрометра для анализа радиоактивных материалов – В сб.: Тезисы докладов III международная молодежная научная школа-конференция «Современные проблемы физики и технологий», 2014, с. 41–42.

9. С.Н. Пья, К.Ф. Власик, В.М. Грачев, В.В. Дмитренко, А.С. Новиков, А.Е. Шустов, Д.В. Петренко, С.Е. Улин, З.М. Утешев, И.В. Чернышева. Моделирование ксенонового гамма-спектрометра для задач идентификации и паспортизации радиоактивных материалов. – В сб.: Тезисы докладов науч. сессии НИЯУ МИФИ-2014, т. 1., Актуальные проблемы физики ядра, частиц, астрофизики и космологии, с. 57.

10. С.Н. Пья, К.Ф. Власик, В.М. Грачев, В.В. Дмитренко, А.С. Новиков, А.Е. Шустов, Д.В. Петренко, С.Е. Улин, З.М. Утешев, И.В. Чернышева. Моделирование ксенонового гамма-спектрометра для работы с радиоактивными отходами. – В сб.: Тезисы докладов науч. сессии НИЯУ МИФИ-2015, т. 1. Радиационные методы и приборы для исследования структуры и свойств вещества, с. 180.

11. С.Н. Пья, К.Ф. Власик, В.М. Грачев, В.В. Дмитренко, А.С. Новиков, А.Е. Шустов, Д.В. Петренко, С.Е. Улин, З.М. Утешев, И.В. Чернышева.

Определение активности радиоактивных отходов с помощью ксенонового гамма-спектрометра. Краткие сообщения по физике, 2015, т. 42, № 8, с.41-47 (журнал входит в базы данных Web of Science и Scopus).

12. С.Н. Пья, К.Ф. Власик, В.М. Грачев, В.В. Дмитренко, А.С. Новиков, А.Е. Шустов, Д.В. Петренко, С.Е. Улин, З.М. Утешев, И.В. Чернышева. Идентификация радиоактивных отходов по гамма-излучению радионуклидов с помощью ксенонового гамма-спектрометра. Евразийское Научное Объединение, 2015, т. 2, № 6, с. 16-19 (журнал входит в базу данных РИНЦ).