

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ЯДЕРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ «МИФИ»

**ИЗМЕРЕНИЕ ОТЛОЖЕНИЙ ЯДЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ
В ТЕХНОЛОГИЧЕСКОМ ОБОРУДОВАНИИ**

Лабораторный практикум

*Рекомендовано к изданию
УМО «Ядерные физика и технологии»*

Москва 2014

УДК 621.039.58(076.5) 621.039.53(076.5) + 620.1.08(076.5)
ББК 31.46я7
ИЗ7

Измерение отложений ядерных материалов в технологическом оборудовании: Лабораторный практикум / *В.В. Афанасьев, А.Ф. Кожин, В.Е. Смирнов, Ю.В. Стогов.* – М.: НИЯУ МИФИ, 2014. — 36 с.

Лабораторный практикум составлен в соответствии с Государственным образовательным стандартом ФГОС-3.

Приводится последовательное изложение метода обобщенной геометрии для определения массы отложений ядерных материалов в технологическом оборудовании и описание комплекса лабораторных работ по применению метода обобщенной геометрии для измерения массы отложений ядерных материалов в моделях технологических каналов.

Предназначен для студентов и магистров, специализирующихся по направлению «Безопасное обращение с ядерными материалами». Может быть рекомендован аспирантам и работникам промышленности.

Подготовлен в рамках Программы создания и развития НИЯУ МИФИ.

Рецензент канд. тех. наук С.С. Ломакин

ISBN 978-5-7262-1915-8

© Национальный исследовательский
ядерный университет «МИФИ», 2014

СОДЕРЖАНИЕ

Введение.....	4
Принципы определения массы отложений ядерных материалов (ЯМ).....	5
Практическая реализация метода обобщенной геометрии.....	8
Конструкция детектора для измерения отложений ЯМ.....	9
Калибровка детектора для измерения массы точечного отложения ЯМ.....	12
Калибровка детектора для измерения массы однородного линейного отложения ЯМ.....	13
Калибровка детектора для измерения массы однородного плоского отложения ЯМ.....	14
Компоненты погрешностей при определении массы ЯМ в отложениях.....	17
Методы повышения точности измерения массы отложений ЯМ.....	19
Подтверждение выбранного способа аппроксимации отложения ЯМ.....	19
Поправки на ослабление гамма-излучения в конструкционных материалах и в материале отложения ЯМ.....	20
Поправка на конечные размеры отложений ЯМ.....	21
Рекомендации по выполнению лабораторных работ.....	23
Лабораторная работа 1. Измерение точечных отложений ЯМ...	23
Лабораторная работа 2. Измерение линейных отложений ЯМ....	27
Лабораторная работа 3. Измерение плоских отложений ЯМ.....	29
Лабораторная работа 4. Измерение точечных и линейных отложений ЯМ на фоне источников гамма-излучения.....	30
Диаграммы для контроля качества измерений.....	31
Вопросы для самопроверки и подготовки к защите практикума....	31
Список использованной литературы.....	32
Приложение. Измерительная аппаратура и программа управления спектрометром гамма-излучения.....	33

ВВЕДЕНИЕ

В элементах конструкций (коробах, трубопроводах) технологических установок для переработки ядерных материалов (ЯМ) могут образовываться отложения ЯМ. Констатация и осознание такой возможности ставят специалистов-разработчиков и эксплуатационный персонал установок перед необходимостью решения следующих проблем [1-3]:

нельзя допустить, чтобы масса отложений ЯМ приближалась к критической массе и создавала угрозу возникновения самоподдерживающейся цепной реакции деления ЯМ как в штатных, так и в любых нештатных ситуациях при эксплуатации технологического оборудования;

наличие неучтенных отложений ЯМ в технологическом оборудовании влияет на величину заводской инвентаризационной разности ЯМ, характеризующей качество учета и контроля ЯМ.

На основе опыта промышленной переработки ЯМ известно несколько механизмов накопления отложений ЯМ:

постепенное осаждение мелких частиц ЯМ в зонах с плохой циркуляцией или низкой скоростью потока;

химические реакции ЯМ с материалом внутренних стенок оборудования; миграция ЯМ в материалах стенок оборудования;

разбрызгивание ЯМ или спекание ЯМ с материалами технологического оборудования (в результате химических реакций);

электростатический механизм накопления отложений ЯМ.

Известно, что определение мест отложений ЯМ в технологическом оборудовании, а также возврат отложений ЯМ в технологический цикл – сложные задачи. Вследствие значительной длины технологических каналов и их сложной формы, как правило, трудно обеспечить доступ к отложениям ЯМ (для их измерения) без разрушения (вырезания участков с отложениями ЯМ).

Измерения массы отложений ЯМ в технологическом оборудовании необходимы для осуществления учета и контроля ЯМ и исключения угрозы ядерной аварии.

Некоторые данные по отложениям ЯМ в установках для переработки урана или плутония приведены в табл. 1.

Таблица 1

**Данные по отложениям ЯМ в установках
для переработки урана или плутония**

Оборудование	Масса отложений ЯМ, г
Перчаточные боксы	0 - 50
Дробилки	1 - 100
V - образные смесители	1 - 50
Фильтры перед перчаточными боксами	2 - 100
Фильтры после перчаточных боксов	10 - 100
Стеклянные колонны	1
Кольцевые резервуары	1 - 10
Поддоны для растворителей	10 - 500
Небольшие печи для прокаливания	5 - 50
Печи	50 - 500
Печи для сжигания	Несколько тысяч
Бетонные сливные бассейны	Несколько тысяч

**ПРИНЦИПЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ МАССЫ ОТЛОЖЕНИЙ
ЯДЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ (ЯМ)**

Ядерные материалы могут быть идентифицированы по спектрам их гамма-излучения (табл. 2). Интенсивность гамма-излучения, сопровождающего определенный тип распада ЯМ, должна быть пропорциональна его массе. Это обстоятельство создает только принципиальную возможность оценки массы ЯМ в отложении объемом V по экспериментально определенной интенсивности гамма-линий, испускаемых ЯМ (рис. 1), так как гамма-излучение поглощается как в ЯМ, так и в конструкционных материалах элементов технологических каналов. Причем поглощение гамма-излучения зависит как от пространственного распределения масс ЯМ $m_{\text{ЯМ}}(\vec{r})$ и масс конструкционных материалов $m_{\text{КМ}}(\vec{r})$, так и от положения детектора гамма-излучения относительно отложения ЯМ (см. рис. 1 и (1)).

**Данные по гамма-излучению некоторых изотопов урана
и плутония**

Изотоп	Удельная активность изотопа, Бк/г	Энергия гамма- излучения, кэВ	Интенсивность гамма-излучения, $\text{с}^{-1} \cdot \text{г}^{-1}$
^{234}U	$2,3 \cdot 10^8$	120,9	$9,4 \cdot 10^4$
^{235}U	$8,0 \cdot 10^4$	143,8	$7,8 \cdot 10^3$
		163,4	$3,7 \cdot 10^3$
		185,7	$4,3 \cdot 10^4$
		202,1	$8,0 \cdot 10^2$
^{238}U (в равновесии с $^{234\text{m}}\text{Pa}$)	$1,2 \cdot 10^4$	205,3	$4,0 \cdot 10^3$
		742,8	7,1
		766,4	26
		786,3	4,3
^{239}Pu	-	1001	75
		414	-

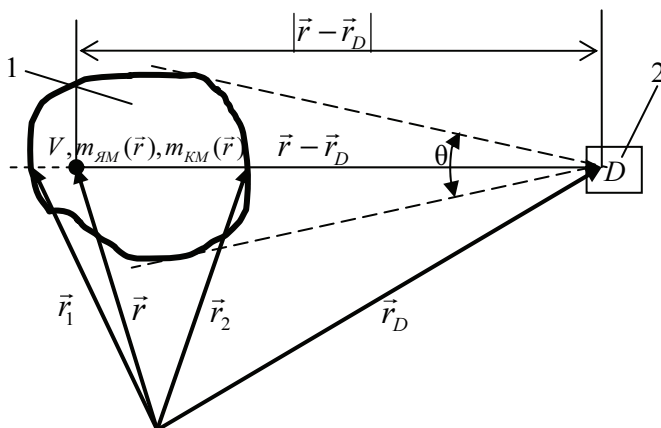


Рис. 1. Геометрия эксперимента по измерению гамма-излучения от отложения ЯМ: 1 — отложение ЯМ; 2 — детектор гамма-излучения

Геометрические формы отложений ЯМ в установках могут быть разными, поэтому для измерения масс отложений ЯМ неприменим

метод калибровки детектора в конкретной геометрии, который может использоваться для измерения ЯМ в виде образцов.

Задача неразрушающего определения массы ЯМ в отложениях $M_{\text{ЯМ}} = \int_V m_{\text{ЯМ}}(\vec{r}) dV(\vec{r})$ на основе результатов экспериментального определения величины C — интенсивности характерных линий в спектре $S(E)$ гамма-излучения ЯМ — сводится к решению интегрального уравнения

$$\int_V \int_{E_1}^{E_2} \frac{S(E) \cdot m_{\text{ЯМ}}(\vec{r})}{4\pi \cdot |\vec{r} - \vec{r}_D|^2} \cdot \exp \left[-[\sigma_{\text{ЯМ}}(E)] \cdot \int_{\vec{r}_1}^{\vec{r}_2} m_{\text{ЯМ}}(\vec{r}') \cdot d\vec{r}' - [\sigma_{\text{КМ}}(E)] \cdot \int_{\vec{r}_1}^{\vec{r}_2} m_{\text{КМ}}(\vec{r}') \cdot d\vec{r}' \right] \cdot dE \cdot dV(\vec{r}) = C, \quad (1)$$

которое относится к классу некорректных задач (не имеющих единственного решения).

Приближенные решения таких задач могут быть получены только при наличии априорной информации о пространственных распределениях массы измеряемого материала $m_{\text{ЯМ}}(\vec{r})$ и вероятности поглощения испускаемого им гамма-излучения $\sigma_{\text{ЯМ}}(E)$. Распределение массы конструкционных материалов $m_{\text{КМ}}(\vec{r})$ и вероятность поглощения этими материалами гамма-излучения $\sigma_{\text{КМ}}(E)$, как правило, известны и определяются конструкцией установки, в которой образовались отложения ЯМ.

В Лос-Аламосской национальной лаборатории (*LANL*, США) предложен упрощенный способ получения априорной информации о распределении масс ЯМ – источников гамма-излучения, образованных отложениями ЯМ, а также способ калибровки детекторов на основе метода обобщенной геометрии.

В соответствии с методом обобщенной геометрии множество источников гамма-излучения, образованных отложениями ЯМ, относят к одному из трех базовых типов:

точечный источник гамма-излучения (для аппроксимации отложения ЯМ в насосах, фильтрах, вентилях, ловушках, участках изгибов трубопроводов и др.);

однородный линейный источник гамма-излучения (для аппроксимации отложения ЯМ в длинных и узких трубопроводах, углах коробов и др.);

плоский однородный источник гамма-излучения (для аппроксимации отложения на полу помещений, на внутренних стенках больших коробов, на внутренних стенках контейнеров большого объема после выгрузки из них ЯМ).

Отнесение отложения ЯМ к одному из базовых типов проводится на основе результатов предварительного экспериментального изучения (разведки) поля гамма-излучения отложения ЯМ с целью определения контура отложения ЯМ, идентификации ЯМ. Разведка – обязательный этап эксперимента по определению массы отложения ЯМ. От качества разведки зависит надёжность классификации источников гамма-излучения и в конечном итоге достоверность измерения массы отложения ЯМ.

Для калибровки детектора гамма-излучения по энергии используются гамма-источники с известными данными по гамма-излучению.

Для калибровки детектора гамма-излучения по методу обобщенной геометрии используются образцы из ЯМ с известным нуклидным составом.

ПРАКТИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ МЕТОДА ОБОБЩЕННОЙ ГЕОМЕТРИИ

Проблема измерения массы отложений ЯМ особенно актуальна на предприятиях, использующих высокообогащенные уран или плутоний. Организация работ с этими материалами сопряжена с необходимостью соблюдения исключительно жестких требований по физической защите, учету и контролю ЯМ, с оформлением необходимых для таких работ лицензий.

На рис. 2 приведены спектры гамма-излучения образцов из урана высокого и низкого обогащения. Эти спектры получены на сцинтилляционном спектрометре гамма-излучения с монокристаллом из NaI(Tl). Оба спектра содержат фотопики полного поглощения с $E_{\gamma}=185,7$ кэВ. В спектре гамма-излучения урана низкого обогащения наблюдаются гамма-линии ^{238}U с энергией выше 185,7 кэВ. При определении отложений ЯМ из высокообогащенного урана имеется

возможность упрощения процедуры обработки измеренных спектров. В спектре (см. рис. 2) выделяют две области. В одной из них находится гамма-линия с $E_{\gamma}=185,7$ кэВ. Другая область, не содержащая интенсивных гамма-линий урана, может использоваться для определения фона гамма-излучения под фотопиком полного поглощения с $E_{\gamma}=185,7$ кэВ. Площадь пика полного поглощения гамма-линии с $E_{\gamma}=185,7$ кэВ может быть получена как разность числа импульсов для соответствующих выбранных участков спектра гамма-излучения.

При определении масс отложений ЯМ из урана низкого обогащения необходимо использовать программу обработки спектра гамма-излучения для определения площадей пиков полного поглощения регистрируемых интенсивностей гамма-линий, используемых в качестве меры ^{235}U и ^{238}U .

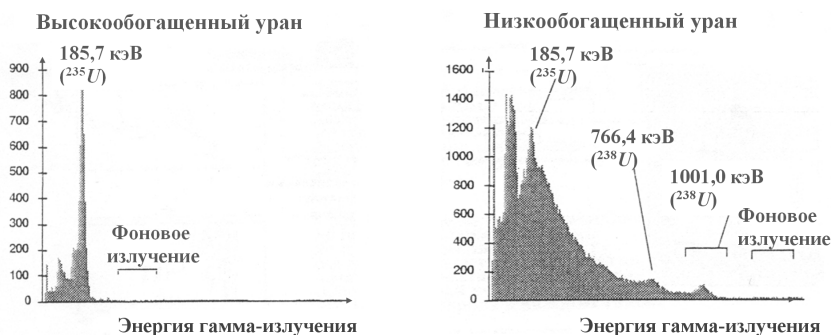


Рис. 2. Спектры гамма-излучения урана высокого и низкого обогащения

КОНСТРУКЦИЯ ДЕТЕКТОРА ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ОТЛОЖЕНИЙ ЯМ

При выполнении лабораторных работ для определения массы отложений ЯМ используется сцинтилляционный блок детектирования с монокристаллом из NaI(Tl) (рис. 3). Блок детектирования размещен внутри защиты из свинца. Толщина нижней и боковой стенок защиты 15 мм. Для поглощения рентгеновского излучения, которое может возникать в свинце, монокристалл из NaI(Tl) экранирован слоем кадмия толщиной 1 мм. Верхняя стенка защиты

представляет собой коллиматор гамма-излучения из свинца (высота $h=100$ мм, диаметр отверстия $d=28$ мм). Геометрические размеры коллиматора гамма-излучения выбраны в соответствии с условиями эксперимента: обогащение урана по изотопу ^{235}U в составе ЯМ, геометрия отложения ЯМ, пространство, доступное для выполнения измерений.

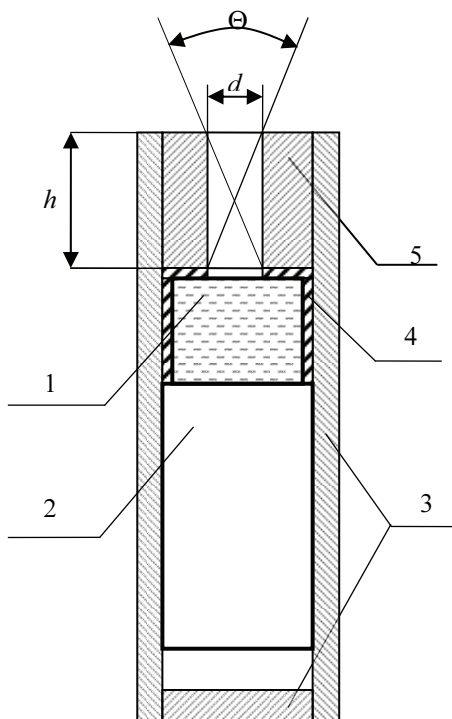


Рис. 3. Конструкция блока детектирования для определения массы отложений ЯМ: 1 — монокристалл из NaI(Tl); 2 — фотоэлектронный умножитель; 3 — боковая и нижняя защита от гамма-излучения (свинец); 4 — защита от рентгеновского гамма-излучения (кадмий); 5 — коллиматор гамма-излучения (свинец)

Калибровка детектора (рис. 4) выполняется с использованием образца из ЯМ. Определяется величина C_i — скорость счета для фотопика полного поглощения гамма-излучения в выбранном диапазоне энергий E_γ от образца (классифицируемого как точечный ис-

точник), помещаемого в позиции с индексами $i=0, 1, 2, \dots, 10$. Расстояние между позициями (шаг смещения образца) выбрано одинаковым и равно Δr . По результатам измерений определяется функция отклика детектора ^{*)} (рис. 5). Затем определяются коэффициенты пропорциональности для точечного, линейного и плоского отложения ЯМ, эффективная длина однородного линейного отложения ЯМ, эффективная площадь однородного плоского отложения ЯМ.

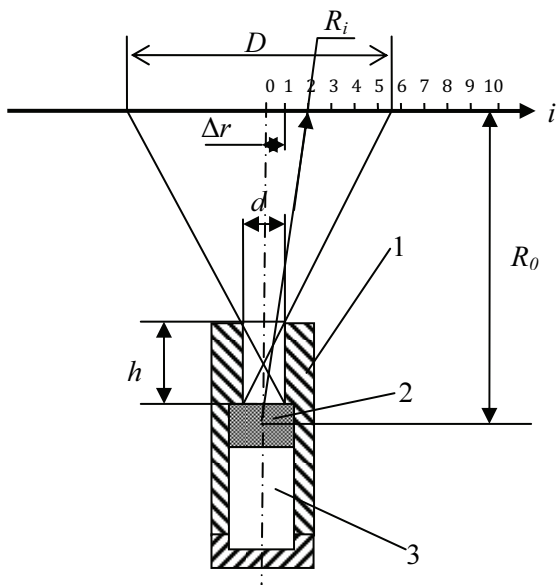


Рис. 4. Схема размещения блока детектирования и образца из ЯМ для калибровки по методу обобщенной геометрии отложений:

1 — защита от гамма-излучения, включая коллиматор гамма-излучения (свинец);
 2 — монокристалл из NaI(Tl); 3 — фотоэлектронный умножитель; R_0 — расстояние между детектором и линией, вдоль которой размещается образец из ЯМ для калибровки; R_i — расстояние от центра детектора до i -й позиции; h — высота коллиматора; d — диаметр отверстия коллиматора; Δr — шаг смещения образца;
 цифрами 0 — 10 обозначены позиции для размещения образца из ЯМ при калибровке системы детектор-образец

^{*)} Под откликом детектора (см. рис. 4) понимается зависимость скорости счета для фотопика полного поглощения гамма-излучения в выбранном диапазоне энергий E_γ от положения источника (образца из ЯМ).

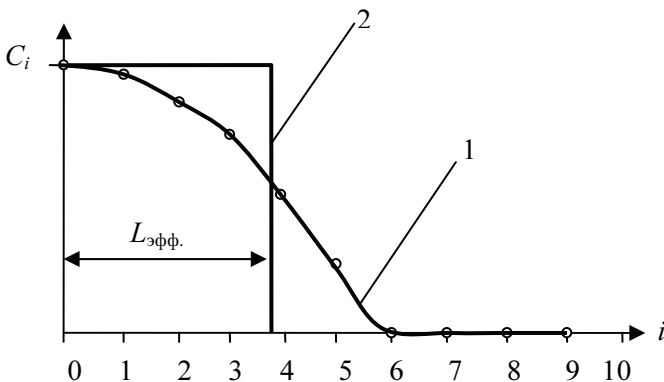


Рис. 5. Функции отклика для реального и идеального детектора: 1 — измеренный отклик; 2 — отклик для идеального детектора; цифрами 0 — 10 обозначены позиции для размещения образца из ЯМ при калибровке системы детектор-образец

КАЛИБРОВКА ДЕТЕКТОРА ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ МАССЫ ТОЧЕЧНОГО ОТЛОЖЕНИЯ ЯМ

Скорость счета для фотопика полного поглощения гамма-излучения в выбранном диапазоне энергий E_γ от точечного источника (образца) массой m , находящегося на расстоянии r от детектора (в непоглощающей среде и при отсутствии самопоглощения), может быть выражена соотношением

$$C(R) = \frac{\varepsilon Q m}{4 \pi R^2} = \frac{1}{K_p} \frac{m}{R^2}, \quad (2)$$

где Q — интенсивность источника на единицу массы; ε — эффективность регистрации гамма-излучения; $\frac{1}{K_p} = \frac{\varepsilon Q}{4 \pi}$ — коэффициент пропорциональности для точечного источника.

Коэффициент K_p определяется на основе скорости счета $C(R_0)$ от образца массой m_0 , расположенного на оси детектора на расстоянии R_0 от него (в точке 0 в соответствии с рис. 4):

$$K_p = \frac{m_0}{C_0 R_0^2}. \quad (3)$$

Масса m неизвестного точечного отложения с таким же нуклидным составом, что и у образца из ЯМ, используемого для калибровки, размещенного на расстоянии R от детектора (на его оси), определяется из выражения:

$$m = K_p \cdot C(R) \cdot R^2. \quad (4)$$

Используя контрольный образец с известной массой ЯМ, размещенный на расстоянии R от детектора, можно проверить качество калибровки измерительной системы.

КАЛИБРОВКА ДЕТЕКТОРА ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ МАССЫ ОДНОРОДНОГО ЛИНЕЙНОГО ОТЛОЖЕНИЯ ЯМ

Для калибровки детектора используется точечный образец из ЯМ массой m_0 (см. рис. 4).

Массовая линейная плотность отложения ЯМ на интервале Δr определяется выражением

$$\lambda_0 = \frac{m_0}{\Delta r}.$$

Для однородного линейного отложения ЯМ суммарный отклик детектора C_{tot} определяется как сумма откликов детектора гамма-излучения по всем позициям, в которых размещается образец из ЯМ для калибровки:

$$C_{tot} = \sum_{i=-\infty}^{+\infty} C_i = 2 \cdot \sum_{i=0}^{+\infty} C_i - C_0. \quad (5)$$

Известно, что экспериментально определенная функция отклика для реального детектора отличается от функции отклика для идеального детектора (см. рис. 5).

Для определения масс ЯМ в виде линейных отложений удобно пользоваться понятием идеального детектора, у которого форма функции отклика – прямоугольная со значением в максимуме $C_0(R)$. В этом случае эффективная длина линейного отложения $L_{эфф}$ определяется из уравнения

$$C_{tot}(R) \cdot \Delta r = C_0(R) \cdot L_{эфф}. \quad (6)$$

Определив из (6) $L_{эфф}$ и используя (5), выражение для определения $L_{эфф}$ имеет вид:

$$L_{эфф} = \frac{\Delta r \cdot C_{tot}}{C_0} = \sum_{i=-\infty}^{+\infty} \Delta r \cdot \frac{C_i}{C_0} = 2 \cdot \Delta r \cdot \sum_{i=0}^{\infty} \frac{C_i}{C_0} - \Delta r. \quad (7)$$

Преобразуем (6) к виду

$$C_{tot} = C_0 \cdot \frac{L_{эфф}}{\Delta r} = \lambda_0 \cdot C_0 \cdot \frac{L_{эфф}}{m_0}. \quad (8)$$

Скорость счета для фотопика полного поглощения гамма-излучения в выбранном диапазоне энергий E_γ пропорциональна λ — линейной плотности отложения ЯМ и обратно пропорциональна R — расстоянию от отложения ЯМ до детектора. Поэтому

$$C_{tot}(\lambda, R) = C_{tot} \cdot \frac{\lambda}{\lambda_0} \cdot \frac{R_0}{R} = \lambda \cdot \frac{C_0 \cdot L_{эфф}}{m_0} \cdot \frac{R_0}{R}. \quad (9)$$

Разрешим (9) относительно λ :

$$\lambda = \frac{m_0}{C_0 \cdot L_{эфф} \cdot R_0} C_{tot}(\lambda, R) \cdot R = K_L \cdot C_{tot}(\lambda, R) \cdot R, \quad (10)$$

$$\text{где } K_L = \frac{m_0}{C_0 \cdot L_{эфф} \cdot R_0} \quad (11)$$

калибровочный коэффициент для однородного линейного отложения ЯМ.

КАЛИБРОВКА ДЕТЕКТОРА ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ МАССЫ ОДНОРОДНОГО ПЛОСКОГО ОТЛОЖЕНИЯ ЯМ

На рис. 6 приведена схема размещения блока детектирования и образца из ЯМ для калибровки по методу обобщенной геометрии (для измерения однородных плоских отложений ЯМ).

Преобразование локальной массы образца из ЯМ в поверхностную плотность выполняется следующим образом. Поверхностная плотность σ однородного отложения ЯМ определяется выражением

$$\sigma = \frac{m_0}{\Delta s}, \quad (12)$$

где m_0 – масса образца из ЯМ, соответствующая элементу площади Δs однородного плоского отложения ЯМ.

Отклик детектора от i -й кольцевой зоны однородного плоского отложения будет больше в $\left(\frac{S_i}{\Delta s}\right)$ раз отклика детектора от образца из ЯМ массой m_0 , размещенного в i -й позиции относительно детектора ($i=0, 1, 2, \dots$).

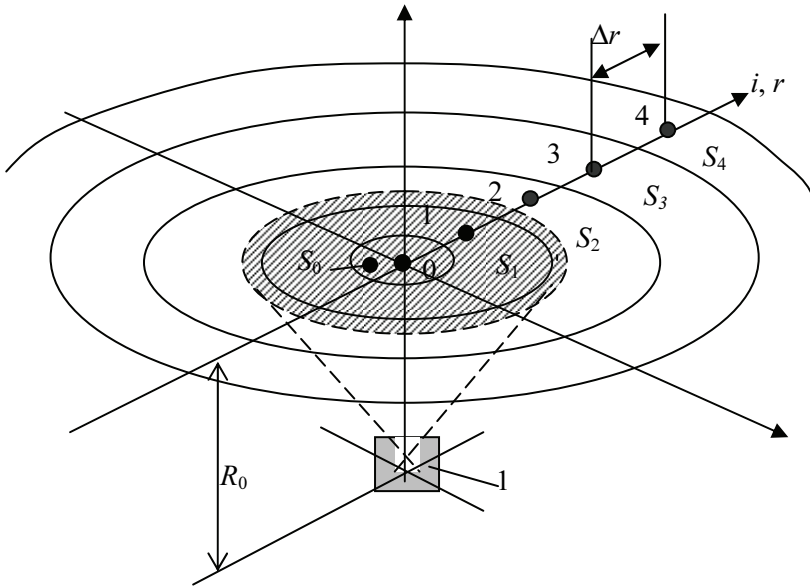


Рис. 6. Схема размещения детектора и образца из ЯМ для калибровки по методу обобщенной геометрии (для измерения однородных плоских отложений ЯМ): 1 — детектор гамма-излучения; R_0 — расстояние от детектора до плоскости отложения; S_0 — площадь центральной зоны; S_i — площадь i -й кольцевой зоны ($i=0, 1, 2, \dots$); штриховкой показана эффективная площадь отложения ЯМ, соответствующая полю обзора детектора

Учитывая вышеизложенное, скорость счета для фотопика полного поглощения гамма-излучения в выбранном диапазоне энергий E_γ

от однородного плоского отложения ЯМ с поверхностной плотностью σ определяется на основе измерения отклика детектора C_i от точечного образца из ЯМ, помещенного в i -ю позицию:

$$C = \sum_{i=1}^{\infty} \frac{S_i}{\Delta s} C_i + \frac{S_0}{\Delta s} C_0. \quad (13)$$

Площадь i -й кольцевой зоны отложения $S_i = 2\pi \cdot i \cdot (\Delta r)^2$.

Площадь центральной зоны отложения $S_0 = \frac{\pi(\Delta r)^2}{4}$.

Скорость счета C_{FULL} для фотопика полного поглощения гамма-излучения в выбранном диапазоне энергий E_γ от однородного плоского отложения ЯМ с поверхностной плотностью, определяемой выражением (12) для детектора, у которого поле обзора не ограничено, выражается через аналогичную скорость счета C_0 от образца из ЯМ в позиции 0 соотношением

$$C_{FULL} = \frac{C_0}{\Delta s}. \quad (14)$$

Разделив (13) на (14), получим выражение для определения эффективной площади детектора для измерения однородных плоских отложений:

$$S_{эфф} = \frac{C}{C_{FULL}} = \frac{C}{\left[\frac{C_0}{\Delta s}\right]} = \sum_{i=1}^{\infty} S_i \cdot \frac{C_i}{C_0} + S_0 = \pi \cdot (\Delta r)^2 \left[2 \cdot \sum_{i=1}^{\infty} i \cdot \frac{C_i}{C_0} + \frac{1}{4} \right]. \quad (15)$$

Скорость счета для фотопика полного поглощения гамма-излучения в выбранном диапазоне энергий E_γ для плоского отложения ЯМ с поверхностной плотностью σ , отличной от калибровочной поверхностной плотности σ_0 , определяется выражением

$$C(\sigma) = C(\sigma_0) \cdot \frac{\sigma}{\sigma_0} = \sigma \cdot \frac{C_0 \cdot S_{эфф}}{m_0}. \quad (16)$$

Неизвестная массовая поверхностная плотность однородного плоского отложения ЯМ (при размещении детектора на расстоянии R от этого отложения) определяется выражением

$$\sigma = \frac{m_0}{S_{\text{эфф}} \cdot C_0} \cdot C(R) = K_A \cdot C(R), \quad (17)$$

где K_A — коэффициент, используемый для определения массы ЯМ однородных плоских отложений ЯМ:

$$K_A = \frac{m_0}{S_{\text{эфф}} \cdot C_0}. \quad (18)$$

КОМПОНЕНТЫ ПОГРЕШНОСТЕЙ ПРИ ОПРЕДЕЛЕНИИ МАССЫ ЯМ В ОТЛОЖЕНИЯХ

Ниже перечислены основные компоненты погрешностей, возникающих при использовании неразрушающей методики определения массы отложений ЯМ, основанной на регистрации гамма-линии ^{235}U с $E_\gamma=185,7$ кэВ.

1. Погрешность, обусловленная использованием метода обобщенной геометрии. В соответствии с этим методом многообразие геометрических форм отложений сводится к одному из трех базовых типов источников гамма-излучения: точечному, однородному линейному и однородному плоскому. При использовании этого метода должен быть выполнен корректный учет следующих эффектов:

поглощение гамма-излучения в измеряемом ЯМ (самопоглощение);

поглощение гамма-излучения в конструкционных материалах элементов технологического оборудования;

конечная протяженность точечного источника и конечная толщина линейного источника. Этот эффект возникает вследствие изменения расстояния $|\vec{r} - \vec{r}_D|$ от чувствительного объема детектора до отдельных элементов отложения (см. рис. 1); при этом суммирование вкладов гамма-излучения от них производится с весом $(1/|\vec{r}|^2)$ для точечного отложения ЯМ и с весом $(1/|\vec{r}|)$ для однородного линейного отложения ЯМ. При измерении однородных плоских отложений этот компонент погрешности отсутствует, так как интенсивность гамма-излучения, регистрируемого от однородной

бесконечной плоскости, не зависит от расстояния между плоскостью отложения и детектором.

2. Погрешность фона гамма-излучения. Особенно велико влияние фона гамма-излучения, если за измеряемым отложением ЯМ в поле обзора детектора имеются другие отложения ЯМ.

3. Погрешность, обусловленная нестабильностью работы измерительной аппаратуры.

4. Погрешность, обусловленная некорректной калибровкой измерительной аппаратуры.

5. Погрешность, с которой известны характеристики стандартных образцов и (или) эталонов, используемых при калибровке.

6. Статистическая погрешность.

7. Погрешность, с которой известен нуклидный состав измеряемого отложения ЯМ.

Априорную оценку погрешности измеренной массы отложения ЯМ получить сложно, так как неизвестна структура отложения ЯМ, а также неизвестна погрешность, обусловленная отнесением отложения ЯМ к одному из базовых типов.

Практика проведения учебных курсов по измерению отложений ЯМ в *LANL* показала, что даже в идеальных лабораторных условиях систематические погрешности определения массы отложения ЯМ составляют от 10 до 50 %, а статистическая погрешность не превышает 10 %.

Один из возможных способов оценки погрешности измерения массы отложений ЯМ основан на определении отклонения результата измерения массы отложения ЯМ относительно среднего значения аналогичной величины (табл. 3).

Таблица 3

Погрешности измерений массы отложений ЯМ с разными химическими составами на некоторых установках в США

Химический состав ЯМ	Оборудование	Погрешность, %
Оксид ВОУ	Трубопроводы	10 - 20
	Трубы	≈10
	Фильтры	50 - 100
	Установки для осаждения	≈15
	Печи для прокаливания	≈20

Окончание табл. 3

	Насосы	≈25
UF ₆	Обогатительный каскад	≈50
PuO ₂	Перчаточные боксы	10 - 50

МЕТОДЫ ПОВЫШЕНИЯ ТОЧНОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ МАССЫ ОТЛОЖЕНИЙ ЯМ

В процессе обработки результатов экспериментов, выполняемых в соответствии с методом обобщенной геометрии, особое внимание должно быть обращено на:

подтверждение выбранного способа аппроксимации отложения ЯМ как источника гамма-излучения;

определение поправки на ослабление гамма-излучения конструкционными материалами (оболочками, стенками) оборудования, в котором возникли отложения ЯМ; определение поправки на самопоглощение гамма-излучения материалами отложения ЯМ;

определение поправки на конечные размеры отложения (для точечных и линейных отложений ЯМ).

Подтверждение выбранного способа аппроксимации отложения ЯМ

В зависимости от расстояния между детектором и отложением ЯМ это отложение ЯМ можно классифицировать как протяженное или как точечное. Поэтому необходимо выполнять дополнительные измерения на разных расстояниях между детектором и отложением из ЯМ. Для этого проводится анализ зависимости скорости счета для фотопика полного поглощения гамма-излучения в выбранном диапазоне энергий E_γ от расстояния R до отложения и выявляется принадлежность этой зависимости к одному из базовых типов отложений в соответствии с выражениями (4), (10) или (17).

**Поправки на ослабление гамма-излучения
в конструкционных материалах и в материале отложения ЯМ**

В соответствии с закономерностью ослабления гамма-излучения полный коэффициент ослабления

$$K_{\text{полный}} = K_{\text{констр.}} \cdot K_{\text{отл.}} \cdot K_{\text{точ. (лин.)}}, \quad (19)$$

где $K_{\text{констр.}}$ и $K_{\text{отл.}}$ — коэффициенты ослабления гамма-излучения в конструкционных материалах и в материалах отложения ЯМ; $K_{\text{точ. (лин.)}}$ — поправки на конечный размер точечного ($K_{\text{точ.}}$) или линейного ($K_{\text{лин.}}$) отложения ЯМ (см. ниже).

Коэффициент ослабления гамма-излучения в конструкционных материалах (короб или труба) определяется выражением

$$K_{\text{констр.}} = \frac{1}{\exp(-\mu \rho x)}, \quad (20)$$

где μ — массовый коэффициент поглощения гамма-излучения материала стенки, $\text{см}^2/\text{г}$; ρ — плотность материала стенки, $\text{г}/\text{см}^3$; x — толщина стенки, в см.

Коэффициент самопоглощения зависит от того, где образовались отложения — на плоскости или в трубе.

Для плоского отложения ЯМ

$$K_{\text{отл.}}^{\text{плоскость}} = \frac{\mu \rho x}{1 - \exp(-\mu \rho x)}. \quad (21)$$

Для трубы

$$K_{\text{отл.}}^{\text{труба}} = \frac{\kappa \mu \rho x}{1 - \exp(-\kappa \mu \rho x)}, \quad (22)$$

где коэффициент $\kappa = 0,8$. Остальные обозначения те же, что и для (21).

Таблица 4

**Массовые коэффициенты ослабления гамма-излучения (μ)
и плотности (ρ) некоторых материалов [2]**

Материал	μ (186 кэВ), $\text{см}^2/\text{г}$	ρ , $\text{г}/\text{см}^3$	μ (414 кэВ), $\text{см}^2/\text{г}$
U	1,46	18,7	-
UO ₂	1,29	1,5 – 10,5	-

Окончание табл. 4

Pu	-	15 -19	0,275
PuO ₂	-	1,5 – 10,5	0,254
Fe	0,147	7,8	0,090
Pb	1,10	11,3	0,210
Al	0,125	2,7	0,094
Cd	0,34	8,6	0,090
O	0,125	-	0,102
Оргстекло	0,134	1,185	0,102
Поливинил-хлорид	0,131	1,1	0,096

Поправка на конечные размеры отложений ЯМ

Эта поправка обусловлена тем, что разные элементы отложения ЯМ вносят неодинаковый вклад в суммарную скорость счета для фотопика полного поглощения гамма-излучения в выбранном диапазоне энергий E_γ (рис. 6).

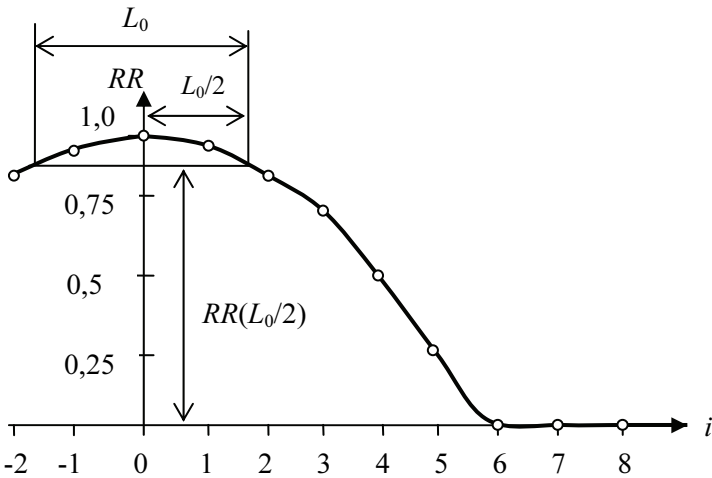


Рис. 6. Нормированный отклик детектора в зависимости от i -й позиции калибровочного образца из ЯМ: L_0 — приведенная длина отложения

Приведенная длина L_0 линейного (или диаметр точечного) отложения длиной (диаметром) L , находящегося на расстоянии R от детектора (рис. 7) определяется выражением

$$L_0 = L \cdot \frac{R_0}{R} . \quad (23)$$

Выражение для усредненного отклика детектора на приведенной длине L_0 может быть представлено в виде:

$$\overline{RR} = \frac{1 + RR\left(\frac{L_0}{2}\right)}{2} . \quad (24)$$

Поправка на конечные размеры для точечного отложения:

$$K_{\text{точ.}} = \frac{1}{(RR)^2} . \quad (25)$$

Поправка на конечные размеры для линейного отложения:

$$K_{\text{лин.}} = \frac{1}{RR} . \quad (26)$$

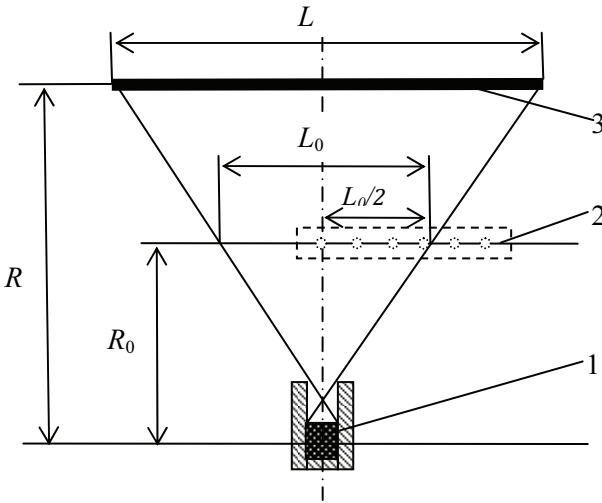


Рис. 7. Схема размещения детектора и образца из ЯМ для калибровки по методу обобщенной геометрии: 1 — детектор; 2 — позиции для размещения образца из ЯМ при калибровке; 3 — точечное или линейное отложение ЯМ; L_0 — приведенная длина отложения ЯМ

РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ВЫПОЛНЕНИЮ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 1 ИЗМЕРЕНИЕ ТОЧЕЧНЫХ ОТЛОЖЕНИЙ ЯМ

Калибровка детектора с использованием образца из ЯМ

Схема размещения блока детектирования и образца из ЯМ для калибровки приведена на рис. 4.

Перед началом измерений с образцом из ЯМ, измеряется фон гамма-излучения без образца из ЯМ (фон гамма-излучения в помещении).

Для измерения отклика детектора, образец последовательно помещается в позиции 1, 2, 3 и т.д. и определяется скорость счета для фотопика полного поглощения гамма-излучения в выбранном диапазоне энергий E_γ . Параметры установки, используемые для калибровки детектора по методу обобщенной геометрии, приведены в табл. 5. Результаты измерений записываются в табл. 6.

Значения параметров K_p , K_L , K_A , $L_{эфф}$, $S_{эфф}$ (см. выражения (3), (11), (18)) определяются на основе экспериментальных данных (с использованием компьютерной программы) и записываются в табл. 7.

Таблица 5

Параметры установки, используемые для калибровки детектора по методу обобщенной геометрии

№, п/п	Параметр	Условное обозначение	Значение, см
1	Расстояние от детектора до линии перемещения образца из ЯМ	R_0	50,0
2	Шаг перемещения образца из ЯМ	Δr	5,0
3	Диаметр отверстия коллиматора гамма-излучения	d	2,8
4	Высота коллиматора гамма-излучения	h	10,0

Таблица 6

Результаты измерений, полученные в процессе калибровки

Номер позиции для размещения образца, i	Измеряемая величина	Время измерения t_i , с	Скорость счета, $C_i = C_i'/t_i$	$C_i - C_\phi$
-	Счет без образца из ЯМ, C_ϕ' (фон гамма-излучения помещения)		$C_\phi = C_\phi'/t_i$	
0	Счет с образцом из ЯМ, C_i' (эффект+фон гамма-излучения)			
1				
2				
3				
4				
5				
6				
7				
8				
9				
10				

Таблица 7

Значения параметров K_P , K_L , K_A , $L_{эфф}$, $S_{эфф}$

Назначение параметра	Значение	Эффективный параметр	Значение
Для измерений точечных отложений, K_P (3)		-	-
Для измерений линейных отложений, K_L (11)		Эффективная длина отложения $L_{эфф}$, см	

Для измерений плоских отложений, K_A (18)		Эффективная площадь отложения $S_{\text{эфф}}$, см ²	
---	--	--	--

***Выявление типа источника, образуемого отложением ЯМ
(разведка отложений)***

Разведка – обязательный этап измерительного эксперимента. На этом этапе применяются дозиметрические приборы. В процессе разведки на поверхности коробов мелом наносятся контуры отложений; выполняется экспертная оценка по идентификации этих отложений. К сожалению, отсутствует однозначный алгоритм проведения разведки. Поэтому настойчивость, тщательность, накопленный опыт и искусство разведчика определяют надежность результатов измерений массы отложений ЯМ.

Измерения точечных отложений ЯМ

На этапе разведки должны быть обнаружены источники гамма-излучений, а контуры размещения этих источников нанесены на поверхность короба и, в первом приближении, классифицированы как точечные.

Оптимизация измерительного эксперимента заключается в следующем:

используя установку, генерирующую маломощный коллимированный световой луч лазера, ось детектора гамма-излучения ориентируется на центральную область отложения ЯМ (не обязательно перпендикулярно плоскости короба);

расстояние между детектором и отложением ЯМ выбирается таким, чтобы точечный источник находился в поле обзора детектора, но при этом в поле обзора детектора не должны находиться другие источники гамма-излучения. Это условие — необходимое, но не достаточное. Известно, при увеличении расстояния между детектором и отложением ЯМ уменьшается погрешность, обусловленная конечным размером отложения ЯМ, но может увеличиваться статистическая погрешность определения скорости счета в фотопике полного поглощения гамма-излучения в выбранном диапазоне энергий E_γ .

Выполнение измерений:

измеряется фон гамма-излучения помещения;

измеряется суммарный отклик детектора гамма-излучения (эф-фekt + фон) на разных расстояниях от отложения ЯМ;

результаты измерений записываются в табл. 8;

подтвердить гипотезу о распределении результатов измерений по закону $\sim(1/r^2)$ и определить массу точечного отложения ЯМ;

определить поправки: на поглощение гамма-излучения в отложении ЯМ; на конечный размер отложения ЯМ. Результаты записать в табл. 8.

Таблица 8

Результаты измерений для точечного отложения ЯМ

Расстояние до отложения, см	Измеряемая величина	Время измерения t_i , с	Скорость счета, $C_i = C_i'/t_i$	$C_i - C_\phi$
-	Счет при отсутствии отложения ЯМ, C_ϕ' (фон гамма-излучения помещения)		$C_\phi = C_\phi'/t_i$	-
-	Счет при наличии отложения ЯМ, C_i' (эф-фekt+фон гамма-излучения)			
Масса отложения, г (без учета поправок на самопоглощение и на конечный размер отложения)	Поправка на самопоглощение	Масса отложения, г (с учетом поправки на самопоглощение)	Поправка на конечный размер отложения	Масса отложения, г (с учетом поправки на конечный размер отложения)

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 2 ИЗМЕРЕНИЕ ЛИНЕЙНЫХ ОТЛОЖЕНИЙ ЯМ

На этапе разведки должны быть обнаружены отложения ЯМ; контуры этих отложений наносятся на поверхность короба; отложения ЯМ классифицируются как однородные линейные источники гамма-излучения.

Оптимизация измерительного эксперимента заключается в следующем:

ось детектора гамма-излучения ориентируется перпендикулярно линии отложения ЯМ и должна пересекать отложение на середине его длины (используя установку, генерирующую маломощный коллимированный световой луч лазера);

расстояние между детектором и центром линейного отложения ЯМ выбирается таким, чтобы однородный линейный источник частично находился в поле обзора детектора, но в поле обзора детектора не должны попадать другие источники. Это условие — необходимое, но не достаточное. Известно, что при увеличении расстояния между детектором и отложением уменьшается погрешность, обусловленная конечным размером отложения, но может увеличиваться статистическая погрешность определения скорости счета в фотопике полного поглощения гамма-излучения в выбранном диапазоне энергий E_γ .

Выполнение измерений:

измеряется фон гамма-излучения помещения;

измеряется суммарный отклик детектора гамма-излучения (эфф-факт + фон) на нескольких расстояниях от отложения ЯМ (минимум пять расстояний, соответствующих среднему геометрическому размеру отложения);

результаты измерений записываются в табл. 9;

подтвердить гипотезу о распределении результатов измерений по закону $\sim(1/r)$ и определить массу однородного линейного отложения ЯМ;

определить поправки: на поглощение гамма-излучения в отложении; на конечную длину линейного отложения ЯМ. Результаты записать в табл. 9.

Таблица 9

Результаты измерений для однородного линейного отложения ЯМ

Расстояние до отложения, см	Измеряемая величина	Время измерений t_i , с	Скорость счета, $C_i = C_i'/t_i$	$C_i - C_\phi$
-	Счет при отсутствии отложения ЯМ, C_ϕ (фон гамма-излучения помещения)		$C_\phi = C_\phi'/t_i$	-
	Счет при наличии отложения ЯМ, C_i' (эффект+фон гамма-излучения)			
Удельная масса отложения, г/см	Фактическая длина отложения, см	Эффективная длина отложения, см		
Масса отложения, г (без учета поправок на самопоглощение и на конечный размер отложения)	Поправка на самопоглощение	Масса отложения, г (с учетом поправки на самопоглощение)	Поправка на конечный размер отложения	Масса отложения, г (с учетом поправки на конечный размер отложения)

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 3 ИЗМЕРЕНИЕ ПЛОСКИХ ОТЛОЖЕНИЙ ЯМ

На этапе разведки должны быть обнаружены отложения ЯМ; контуры этих отложений наносятся на поверхность короба; отложения ЯМ классифицируются как как однородные плоские источники гамма-излучения.

Оптимизация измерительного эксперимента заключается в следующем:

ось детектора гамма-излучения ориентируется перпендикулярно плоскости отложения ЯМ и должна пересекать эту плоскость в центральной части области отложения ЯМ (используя установку, генерирующую маломощный коллимированный световой луч лазера);

расстояние между детектором гамма-излучения и плоскостью короба выбирается таким, чтобы площадь плоского однородного отложения значительно превышала поле обзора детектора.

Выполнение измерений:

измеряется фон гамма-излучения помещения;

измеряется суммарный отклик детектора гамма-излучения (эффект + фон) на разных расстояниях от отложения;

результаты измерений записываются в табл. 10;

подтвердить гипотезу о независимости результатов измерений от расстояния до плоскости и определить удельную массу однородного плоского отложения ЯМ;

определить поправку на поглощение гамма-излучения в отложении ЯМ. Результаты записываются в табл. 10.

Таблица 10

Результаты измерений для однородного плоского отложения ЯМ

Расстояние до отложения, см	Измеряемая величина	Время измерений t_i , с	Скорость счета $C_i = C_i'/t_i$	$C_i - C_\phi$
-	Счет при отсутствии отложения ЯМ, C_ϕ' (фон гамма-излучения помещения)		$C_\phi = C_\phi'/t_i$	-

Окончание табл. 10

	Счет при наличии отложения ЯМ, C_i' (эффект+фон гамма-излучения)			
Удельная масса отложения, г/см ²	Фактическая площадь отложения, см ²	Эффективная площадь отложения, см ²		
Масса отложения, г (без учета поправок на самопоглощение и на конечный размер отложения)	Поправка на самопоглощение	Масса отложения, г (с учетом поправки на самопоглощение)		

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 4

ИЗМЕРЕНИЕ ТОЧЕЧНЫХ И ЛИНЕЙНЫХ ОТЛОЖЕНИЙ ЯМ НА ФОНЕ ИСТОЧНИКОВ ГАММА-ИЗЛУЧЕНИЯ

Такая проблема возникает, когда за измеряемым отложением ЯМ находится отложение с таким же спектром гамма-излучения. Выявить и учесть фоновый источник гамма-излучения можно в процессе разведки, если поле обзора детектора установить вне области измеряемого отложения ЯМ. Таким образом, измерительный эксперимент отличается от обычного (когда отсутствуют фоновые источники) тем, что должно быть выполнено измерение фоновых источни-

ков гамма-излучения с последующим корректным учетом вклада фона гамма-излучения в результаты измерений отложения ЯМ.

ДИАГРАММЫ ДЛЯ КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА ИЗМЕРЕНИЙ

Для контроля качества измерений масс отложений ЯМ необходимо выполнять построение диаграмм:

для параметров, получаемых по методу обобщенной геометрии;

для отклонений измеренных масс отложений ЯМ от заданных значений масс ЯМ, используемых для выполненных экспериментальных задач.

ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ И ПОДГОТОВКИ К ЗАЩИТЕ ПРАКТИКУМА

1. На каких предприятиях топливного цикла ядерной энергетики есть потребность в методике выполнения измерений массы отложения ЯМ?

2. Перечислите цели, поставленные перед специалистами, выполняющими измерение массы отложения ЯМ.

3. Какие механизмы накоплений отложений ЯМ известны?

4. Расскажите о физических принципах измерений отложений ЯМ.

5. Назовите основные положения метода обобщенной геометрии.

6. Перечислите требования к аппаратуре для измерений отложений ЯМ.

7. Расскажите о механизмах детектирования гамма-излучения сцинтилляционным спектрометром.

8. Расскажите о принципе действия фотоэлектронного умножителя.

9. Нарисуйте структурную схему сцинтилляционного спектрометра гамма-излучения.

10. Расскажите о назначении элементов структурной схемы спектрометра гамма-излучения.

11. Нарисуйте аппаратный спектр сцинтилляционного спектрометра гамма-излучения и поясните его характерные детали.
12. Сформулируйте рекомендации по технике измерений отложений ЯМ.
13. Перечислите особенности калибровки измерительной аппаратуры для измерений отложений ЯМ.
14. Перечислите источники погрешностей измерений массы ЯМ.
15. Предложите методы повышения точности измерений отложений ЯМ.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Измерение массы отложений ядерных материалов. Методические материалы курса. Учебно-методический центр по учету и контролю ядерных материалов. — Обнинск, 2005.
2. Пассивный неразрушающий анализ ядерных материалов / Д. Райлли, Н. Энслин, Х. Смит, С. Крайер; Пер. с английского ВНИИА. — М., 2000.
3. Пассивный неразрушающий анализ ядерных материалов. Дополнение 2007 г. / Под ред. Д. Райлли; Пер. с английского ВНИИА. — М., 2013.

ПРИЛОЖЕНИЕ

ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ АППАРАТУРА И ПРОГРАММА УПРАВЛЕНИЯ СПЕКТРОМЕТРОМ ГАММА-ИЗЛУЧЕНИЯ

Измерительная аппаратура

Используется сцинтилляционный блок детектирования гамма-излучения с монокристаллом из NaI(Tl) Ø50x50 мм, который подключается к спектрометрической установке *Inspector-2000*.

Установка *Inspector-2000* состоит из следующих функциональных блоков:

усилитель-формирователь и амплитудно-цифровой преобразователь.

источник для питания сцинтилляционного блока детектирования;

сетевой адаптер;

аккумуляторная батарея с зарядным устройством (во время работы установки от электрической сети аккумуляторная батарея выполняет функции бесперебойного питания).

Установка *Inspector-2000* соединяется через *USB*-интерфейс с портативным компьютером. Управление установкой осуществляется программным обеспечением *Genie-2000* (выбираются коэффициент усиления спектрометрического тракта, рабочие напряжения для питания сцинтилляционного блока детектирования, постоянная времени формирования электрических импульсов, процедура компенсации полюса нулем). Выбранные параметры записываются в специальный файл и автоматически вызываются при загрузке программы, что упрощает настройку и калибровку измерительного тракта.

Световые индикаторы на лицевой панели используются для контроля работоспособности установки (наличие высокого напряжения и т.д.).

Сцинтилляционный блок детектирования размещен внутри защиты от гамма-излучения и содержит коллиматор для обеспечения определенного поля обзора детектора при регистрации гамма-

излучения от отложений ЯМ. Перемещение сцинтилляционного блока в нужную позицию для проведения измерений обеспечивается специальным механизмом.

Подготовка спектрометра к работе

Убедиться в том, что установка собрана правильно и все электрические кабели подключены.

Включить спектрометрическую установку. Включить компьютер. После загрузки операционной системы, запустить программу *Genie-2000*. На экране появится перечень подпрограмм.

В меню *Genie-2000* запустить подпрограмму «Редактор входов МКА», с помощью которой необходимо загрузить файл детектора. Для этого выполняются следующие операции:

- установить курсор на «База данных»;
- выбрать режим «Загрузить»;
- в меню «Файлы» выбрать файл «МКА»;
- нажать последовательно кнопки «Загрузить» и «Готово»;
- выйти из программы «Редактор входов МКА» и вернуться в основное меню *Genie-2000*.

Калибровка спектрометра по энергии

Используется подпрограмма «Набор и анализ гамма-спектров»: выбрать в меню *Genie-2000* подпрограмму «Набор и анализ гамма-спектров» и запустить ее;

выбрать режим работы с детектором. Для этого открыть меню режима «Файл», «Открыть» и выбрать режим «Детектор». Затем отметить в разделе «файл детектора *Det01*», нажать «Открыть» и «Готово». Режим «Файл» позволяет работать со спектрами, набранными ранее и сохраненными на компьютере.

Прежде чем начать набор спектра гамма-излучения, необходимо подать высокое напряжение на фотоэлектронный умножитель сцинтилляционного блока детектирования. Для этого необходимо войти в меню «МКА» и выбрать режим «Настройка». Этот режим позволяет управлять высоким напряжением (режим «Высокое»), усилением и формированием электрических импульсов от детекто-

ра (режим «Усилитель»). Чтобы включить высокое напряжение, нужно войти в режим «Высокое» и нажать кнопку «On». В левом верхнем углу окна диалога появится надпись «Ждите», и пока она не исчезнет, никаких действий предпринимать не следует. Значение и полярность высокого напряжения заданы в файле детектора, их задавать не требуется. Когда высокое напряжение включено, на передней панели прибора включен световой индикатор «HV». Выключение высокого напряжения по окончании работы осуществляется нажатием кнопки «Off».

Установка времени набора спектра гамма-излучения. В меню «МКА» выбрать режим «Установка» и установить время измерения в секундах, минутах или часах по живому или реальному времени, затем нажать кнопку «Принять».

Для набора спектра гамма-излучения необходимо нажать кнопку «Старт». При нажатии кнопки «Стоп» набор спектра гамма-излучения прекращается. По истечении заданного времени измерения набор спектра прекращается. Сброс ранее набранного спектра осуществляется нажатием кнопки «Очистить».

Детальный просмотр отдельных участков спектра осуществляется нажатием кнопки «Растянуть». При этом диалоговое окно программного комплекса *Genie-2000* делится пополам, и в его верхней части появляется участок спектра вблизи того места, где был расположен курсор, а на основном спектре гамма-излучения появляется прямоугольник, изменяя ширину которого или перемещая его с помощью оптической мыши можно изменять границы участка спектра гамма-излучения. Для выхода из этого режима нужно нажать кнопку «Сжать».

Чтобы выполнить калибровку спектрометра гамма-излучения по энергии, необходимо набрать в течение определенного времени спектр гамма-излучения от источника ^{137}Cs (из набора ОСГИ). На диалоговом экране *Genie-2000* должны наблюдаться фотопики полного поглощения с $E_{\gamma}=662$ кэВ и $E_{\gamma}=33$ кэВ. Рекомендуется использовать режим работы установки, при котором цена деления шкалы спектрометра гамма-излучения соответствует 1 кэВ/канал. При этом пик ^{137}Cs с $E_{\gamma}=662$ кэВ располагается примерно в 662 канале. В противном случае, необходимо выбрать определенное значение коэффициента усиления спектрометрического тракта для по-

лучения необходимого значения цены деления шкалы спектрометра гамма-излучения.

Чтобы выполнить калибровку спектрометра гамма-излучения по энергии (после набора спектра гамма-излучения ^{137}Cs), необходимо в режиме «Калибровка» выбрать калибровку «Только по энергии». Затем установить курсор на вершину пика с $E_{\gamma}=662$ кэВ, нажать кнопку «Курсор» и ввести значение энергии гамма-излучения данного пика. Затем повторить ту же операцию для пика с $E_{\gamma}=33$ кэВ.

Проверить правильность выполнения калибровки можно нажатием кнопки «Показать». При этом отображается зависимость энергии гамма-излучения от номера канала. Чтобы завершить калибровку, нужно нажать кнопку «Принять» и сохранить набранный спектр.

В дальнейшем набор спектров гамма-излучения выполняются при ранее выбранных условиях.

Редактор Е.К. Коцарева

Подписано в печать 15.11.2013. Формат 60x84¹/₁₆

Печ. л. 2,25. Уч.-изд. л. 5,0. Тираж 100 экз.

Изд. № 1/33. Заказ № 3.

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ».
115409, Москва, Каширское ш., 31.

ООО «Полиграфический комплекс «Курчатовский».
144000, Московская область, г. Электросталь, ул. Красная, 42.