

3. Кутыков В.А. Облучение кожи радионуклидами, находящимися на поверхности. — АНРИ, 2011, № 3, с. 2—8.
4. Magill J., Galy J. Universal Nuclide Chart. Institute for Transuranium Elements. Karlsruhe, 2005.
5. Голашвили Т.В., Чечев В.П., Лбов А.А. Справочник нуклидов. М.: ЦНИИАтоминформ, 1995.
6. Немец О.Ф., Гофман Ю.В. Справочник по ядерной физике. Киев: Наукова думка, 1976.

7. Гусев Н.Г., Климанов В.А., Машкович В.П., Суворов А.П. Защита от ионизирующих излучений. 3-е изд. М.: Энергоатомиздат, 1989.
8. Шумаков А.В. Определение порога обнаружения радиационного монитора. — Атомная энергия, 2012, т. 113, вып. 3, с. 41—44.

Поступила в Редакцию 28.12.12

УДК 621.039.6

УСТАНОВКА СЧЕТА ВРЕМЕННЫХ СОВПАДЕНИЙ ЧАСТИЦ НА ОСНОВЕ ЦИФРОВОЙ ТЕХНОЛОГИИ ДЛЯ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ ЯДЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Ромоданов В.Л., Белевитин А.Г., Афанасьев В.В., Тихоиванов А.Б., Подойницын Е.А., Козачук Т.Н.
(НИЯУ МИФИ, г. Москва)

Определение наличия и состава ядерных делящихся материалов в закрытых объемах, не подлежащих вскрытию, является важной задачей на разных этапах обращения с ними. Это связано с условиями безопасности эксплуатации ядерно-энергетических установок и нераспространения ядерных материалов в целях предотвращения возможных террористических актов. В заводских условиях состав топлива инспектируется радиохимическими методами, однако после изготовления топливных элементов контроль реального состава усложняется, поскольку имеются защитные покрытия, и, следовательно, необходим неразрушающий анализ их состава. Методы и аппаратура неразрушающего контроля изделий ядерной энергетики и их отходов предназначены для определения количества урана и плутония в закрытых объемах. К числу основных задач неразрушающего контроля можно отнести:

контроль необлученных и облученных ТВС;
определение нуклидного и количественного состава делящихся материалов в отходах ядерного производства;

идентификация ядерных делящихся материалов в различных образцах;

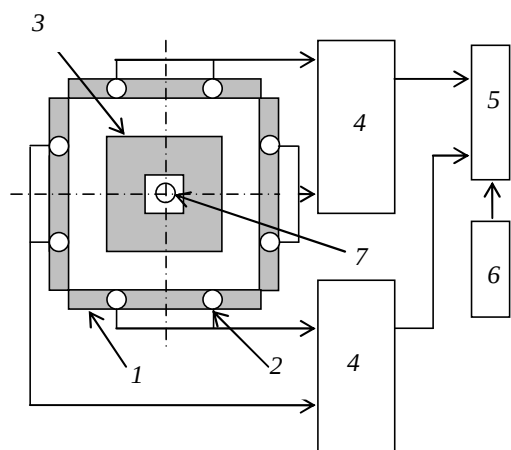
контроль состава ядерных делящихся материалов и матричных элементов в замкнутых объемах без их вскрытия;

обнаружение ядерных делящихся материалов в пунктах пересечения государственных границ.

В настоящей работе описываются методическое обеспечение и установка для измерения эффективной массы ^{240}Pu . В эксперименте опре-

деляли временное распределение скорости счета совпадений частиц, образовавшихся при спонтанном делении ядер в «толстых» защитных контейнерах, для которых невозможно применять метод γ -спектрометрии. В установке использовались высокоэффективные и быстродействующие пластические сцинтилляторы совместно с цифровой технологией сбора и обработки экспериментальных данных. В целях уменьшения стоимости установки в ней не использовались счетчики на основе ^3He .

Описание установки и эксперимента. Измерение временного распределения скорости счета совпадений частиц, образовавшихся при спонтанном делении ядер ^{240}Pu , моделировали с помощью источника нейтронов ^{252}Cf . Четыре пластических детектора установки имели форму квадратного параллелепипеда с размером стороны 500 мм и толщиной 50 мм. Каждый детектор просматривался двумя ФЭУ-30, размещенными симметрично на одной из его узких граней на расстоянии 120 мм от краев. Таким образом, образованные четыре независимых тракта имели выход на цифровую систему синхронного детектирования откликов нейтронов и фотонов. Детекторы располагались по сторонам квадрата и образовывали измерительную камеру размером 500×500×500 мм. В случае активного режима может использоваться импульсный нейтронный генератор или AmLi-источник нейтронов. Внутри установки могут помещаться экраны из различных материалов. В зависимости от типа материала ослабляется нейтронная или фотонная составляющая излучения. Такой подход уменьшает множественность излучения, однако



Р и с. 1. Структурная схема установки измерения скорости счета временных совпадений с пластическими сцинтилляторами: 1 — сцинтиллятор; 2 — ФЭУ; 3 — защита; 4 — цифровая плата; 5 — компьютер; 6 — программное обеспечение; 7 — источник нейтронов

эффект экранировки ядерных делящихся материалов также при этом снижается (рис. 1).

Моделирование ^{240}Pu с помощью ^{252}Cf возможно потому, что спектр испускаемых им нейтронов при спонтанном делении почти идентичен спектру нейтронов спонтанного деления ^{240}Pu , хотя множественность излучения этих нуклидов отличается. Выход нейтронов ^{252}Cf составляет $2,3 \cdot 10^4 \text{ с}^{-1}$, что соответствует $23 \text{ г } ^{240}\text{Pu}$, удельный выход нейтронов которого принимался равным $10^3 \text{ с}^{-1} \cdot \text{г}^{-1}$. Ввиду этого минимальная детектируемая масса ^{240}Pu может быть определена в количестве несколько граммов.

Геометрия эксперимента соответствовала рис. 1. Источник нейтронов помещали в стальную трубку диаметром 19 мм с толщиной стенки 0,2 мм. Всю конструкцию с источником помещали в контейнеры с водой, которые имели квадратное сечение различного размера. Высота уровня воды в контейнерах составляла 330 мм. Максимальная толщина водного слоя 175 мм. Контейнеры устанавливали в середине измерительной камеры. Длительность одного измерения составляла 4 с. Для получения зависимости скорости счета совпадений от толщины защитного слоя воды эксперименты повторяли для каждой толщины защиты от 8 до 15 раз.

Аналогичные эксперименты были проведены с защитными стальными контейнерами. Для моделирования контейнеров использовали набор стальных блоков высотой 500, толщиной 25 мм. Максимальная толщина стенки контейнера составляла 150 мм.

Аппаратурное обеспечение экспериментов. Аппаратурное обеспечение установки состояло из аналого-цифровой измерительной системы с двумя субмодулями типа ADM212x100M, созданными фирмой «Инструментальные системы» (г. Москва). Аппаратура преобразовывала электрические сигналы в цифровую форму с дальнейшим сохранением временной последовательности оцифрованных сигналов. В измерительную систему входят промышленный компьютер, два базовых модуля и разработанное изготовителем программное обеспечение. Субмодуль ADM212x100M содержал два канала 12-разрядного аналого-цифрового преобразования с шагом 10 нс, который определяется частотой дискретизации генератора 100 МГц. Использовали программируемый входной усилитель с полосой пропускания до 70 МГц. На каждой плате находился входной буфер и автономное запоминающее устройство емкостью 4 Гбайт. Программная оболочка ISVI работала под управлением операционной системы Windows и выполняла следующие функции:

задание параметров аналого-цифрового преобразования (коэффициенты усиления и преобразования, частота дискретизации, длительность цикла измерения);

графический вывод преобразованной последовательности входных сигналов на экран персонального компьютера;

запись преобразованной последовательности на жесткий диск;

сохранение установленных режимов для дальнейшего использования.

Цифровая технология обработки результатов экспериментов. Для обработки амплитудно-временного распределения сцинтилляционных откликов от смешанного нейтронного и фотонного излучения в пластических сцинтилляционных детекторах были созданы алгоритм и программа, что позволило вычислять скорость счета реальных совпадений разной кратности. При этом отклики нейтронов и фотонов не разделялись.

Скорость счета совпадений разной кратности вычисляли с помощью статистических соотношений [1]. Они соответствовали вычислению корреляционных связей двойных, тройных и четверных совпадений. При этом можно вычислять скорость счета совпадений для пары, тройки или всех четырех детекторов.

Совпадения анализировали с помощью специально созданной программы [2]. В основу программы счета временных совпадений для четырех детекторов x, y, z, w были положены следующие соотношения:

$$C_{xy}(\tau) = E \left\{ \left[x(t_x) - \bar{x} \right] \left[y(t_y) - \bar{y} \right] \right\} \Big|_{\tau=t_y-t_x}$$

для двойных совпадений;

$$C_{xyz}(\tau_1, \tau_2) =$$

$$= E \left\{ \left[x(t_x) - \bar{x} \right] \left[y(t_y) - \bar{y} \right] \left[z(t_z) - \bar{z} \right] \right\} \Big|_{\substack{\tau_1=t_y-t_x \\ \tau_2=t_z-t_x}}$$

для тройных совпадений;

$$C_{wxyz}(\tau_1, \tau_2, \tau_3) = E \left\{ \left[w(t_w) - \bar{w} \right] \left[x(t_x) - \bar{x} \right] \times \right.$$

$$\left. \times \left[y(t_y) - \bar{y} \right] \left[z(t_z) - \bar{z} \right] \right\} \Big|_{\substack{\tau_1=t_x-t_w \\ \tau_2=t_y-t_w \\ \tau_3=t_z-t_w}}$$

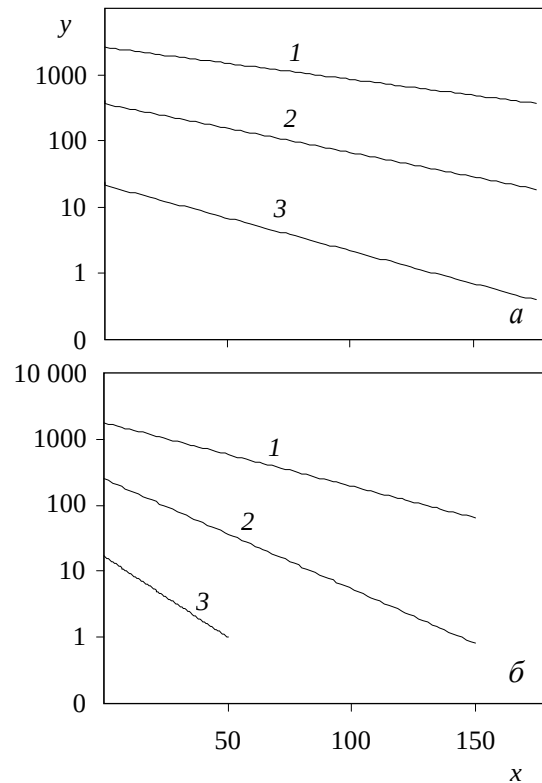
для четверных совпадений,

где E — математическое ожидание; $x(t_x), y(t_y), z(t_z), w(t_w)$ — числовая последовательность, состоящая из нулей и единиц. Например, $x(t_x) = 1$, если в момент времени t_x был зарегистрирован отклик в детекторе x , и $x(t_x) = 0$, если отклик не зарегистрирован; $\bar{x} = E[x(t)]$ — средняя скорость счета откликов в детекторе x , для детекторов y, z, w аналогично.

Временное распределение отклика нейтронов и фотонов в четырех независимых и синхронизированных по времени каналах записывалось в память компьютера, что принципиально позволяло применять к их обработке любые программные комплексы.

Результаты экспериментов. С помощью цифровой технологии можно измерять скорость счета двойных, тройных и четверных временных совпадений частиц источника нейтронов ^{252}Cf , который моделировал наличие четных изотопов плутония в закрытом контейнере с толстыми стенками или матрицей неизвестного состава. Следовательно, такая постановка экспериментов позволяла определять количественный состав эффективной массы плутония в защитных контейнерах с толстыми стенками, что недоступно для γ -спектрометрии. Измерение совпадений различной кратности в установке с водной и стальной защитой показано на рис. 2.

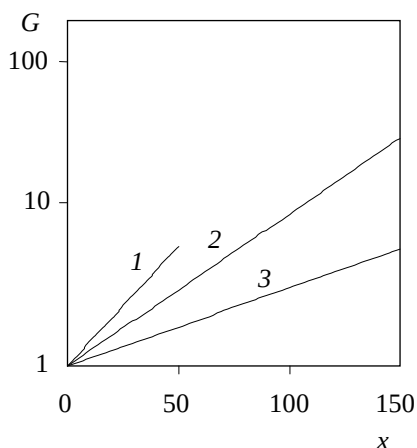
Анализ экспериментов. Измерения показали, что созданная установка имеет высокую чувствительность, так как могут быть определены двойные и тройные совпадения для водного



Р и с. 2. Зависимость скорости счета временных совпадений двойной (1), тройной (2), четверной кратности (3) от толщины водной (а) и стальной защиты (б)

слоя толщиной 175 мм и стального слоя толщиной 150 мм. Измерения контейнеров, имеющих защитные слои подобной толщины, с помощью γ -спектрометрии существенно затруднены. В случае тонких стенок контейнеров могут быть измерены также и четверные совпадения. Во всех случаях водной и стальной защиты показано, что зависимость скорости счета совпадений различной кратности от толщины защитного слоя может быть представлена в виде экспоненты. Отношения скоростей счета совпадений разной кратности от толщины защиты также соответствуют экспоненциальной зависимости и показаны на рис. 3. При этом константа пространственного экспоненциального спада скорости счета совпадений в значительной мере зависит от типа материала защиты.

Закключение. Наиболее важной перспективой применения разработанной цифровой технологии может стать создание установок контроля и идентификации ядерных делящихся материалов, находящихся в замкнутых контейнерах с толстыми стенками и не подлежащих вскрытию. В имеющихся в настоящее время установках такого назначения, например, АWCC используют дорогостоящие счетчики



Р и с. 3. Зависимость отношения относительной скорости счета двойной (1), тройной (2), четверной кратности (3) от толщины водного и стального слоя

тепловых нейтронов типа ^3He [2]. Созданные модернизированные установки подобного типа для счета тройных совпадений используют кольцевые структуры из большого числа гелиевых счетчиков типа ^3He и в настоящее время за рубежом считаются неперспективными ввиду высокой стоимости детекторов тепловых нейтронов.

Созданные в настоящей работе установки счета совпадений на сцинтилляционных блоках, кроме нейтронов, детектируют γ -кванты деления, что повышает множественность частиц и способствует высокой эффективности устройств. Такие устройства могут заменить зарубежные аналоги, не требуют сдвиговых регистров и программ их функционирования и поэтому более экономичны. Первый вариант установки измерений скорости счета временных совпадений представлен в работе [3].

Для определения эффективной массы ^{240}Pu необходимо провести калибровочные измерения со стандартными образцами плутония и получить градуировочную характеристику. В случае содержания в плутониевых образцах легких материалов возникающие при этом нейтроны (α, n) не детектируются, так как не коррелируют по времени с нейтронами спонтанного распада. В случае толстой защиты контейнеров необходимо учитывать влияние их стенок согласно градуировочным характеристикам, подобным приведенным на рис. 2.

Предложенный подход к анализу вторичного излучения ядерных делящихся материалов позволяет сократить номенклатуру используемых приборов, уменьшить поправку на «мертвое» время и конструировать установки нового поколения для контроля ядерных материалов, которые будут обладать следующими преимуществами:

диапазон физических методов контроля и обнаружения ядерных делящихся материалов расширен за счет использования различных программ функционирования и обработки экспериментальных данных;

интегрированные в компьютер платы цифровой обработки сцинтилляционных сигналов отклика ядерных делящихся материалов позволяют отказаться от сдвиговых регистров и зарубежных программ, что снижает затраты на изготовление установки;

оцифрованная база данных сцинтилляционных откликов ядерных делящихся материалов позволяет путем программной обработки и без аналоговых блоков получать информативные параметры состава ядерных делящихся материалов;

хранение в памяти компьютера базы оцифрованных импульсов дает возможность проводить повторную обработку экспериментальных данных.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Michalzo J., Mullens J., Mattigly J. e.a. Physical description of nuclear materials identification systems signatures. — Nucl. Instrum. Meth., 2000, v. 450, p. 531—555.
2. Ensslin N., Harker W., Krick M., Langner D. Application Guide to Neutron Multiplicity Counting. LA-13422-M, 1998.
3. Ромоданов В.Л., Белевитин А.Г., Афанасьев В.В. и др. Установка счета совпадений для обнаружения и контроля делящихся материалов на основе импульсного источника нейтронов и цифровой технологии. — В сб.: Межд. научно-технич. конф. «Портативные генераторы нейтронов и технологии на их основе», 2004, с. 341—345.

Поступила в Редакцию 4.09.12