

РЕГИСТРАЦИЯ НЕЙТРОНОВ

Существует целый ряд различных типов оборудования для регистрации нейтронов. При этом для определения количеств ядерных материалов используются пассивные и активные системы регистрации.

Существует три источника излучения нейтронов из необлученного ядерного топлива:

- Спонтанное деление делящихся изотопов, как для изотопов Pu;
- Вынужденное деление делящихся изотопов (обычно под действием источника нейтронов низкой энергии);
- Реакции под действием альфа-частиц (альфа, α), включая легкие элементы, такие как кислород или фтор.

Нейтроны деления для двух первых категорий излучаются группами по два или более на каждое событие деления. Эта явление определяется как совпадение нейтронов. Почти все изотопы U, Pu и другие трансурановые элементы излучают альфа-частицы. Альфа-частицы взаимодействуют с легкими элементами, которые присутствуют в соединениях (например, в оксидах или фторидах) или в качестве примесей (например, B, Be и Li), и образуют нежелательные фоновые нейтроны. При регистрации нейтронов совпадения их отличают от нейтронов фона с помощью обработки импульсов нейтронов, выделяя коррелированные (во времени) регистрируемые события и исключая фоновые нейтроны (альфа, α), которые излучаются по одному и поэтому не являются коррелированными.

Пассивные регистрирующие системы определяют массу Pu на основании спонтанного деления его четных изотопов (Pu-238, Pu-240 и Pu-242, с преобладающим вкладом от Pu-240). Основной делящийся изотоп Pu-239 имеет обычно изотопную распространенность в топливе 60-80%, однако, он дает незначительный вклад в спонтанное деление. Изотопная распространенность должна быть известной или проверяться - обычно с помощью высокоразрешающего измерения гамма-излучения. Используя изотопную распространенность, скорость счета нейтронов совпадения может быть преобразована в значение полной массы Pu в образце. Для незагрязненных образцов точность результатов измерения - порядка 1% или ниже.

Делящийся изотоп U-235 не имеет достаточно интенсивного спонтанного деления, чтобы его можно было практически использовать для пассивной регистрации. Определение содержания U-235 проводят с помощью нейтронов вынужденного деления, используя AmLi источники нейтронов. Случайные нейтроны низкой энергии от U-238 дают незначительный вклад в измеряемые скорости счета нейтронов совпадения, даже тогда, когда U-235 имеет обогащение всего несколько процентов (например, топливо низкого обогащения).

Детекторы нейтронов основаны на использовании различных реакций поглощения нейтронов. В результате реакций производятся частицы, которые в свою очередь ионизируют газ и производят импульс заряда. Выбор детектора (т.е. поглощающего материала) основывается главным образом на требуемой чувствительности обнаружения нейтронов и на нечувствительности к другим излучениям, например, к гамма-излучению. Почти все детекторы имеют наибольшую чувствительность к нейтронам низких энергий. Поэтому во многих системах, регистрирующих нейтроны, чтобы замедлить нейтроны высоких энергий до тепловых, детекторы окружаются замедляющим материалом, таким, как полиэтилен.

1 ПОЛНЫЙ СЧЕТ НЕЙТРОНОВ

Полный счет нейтронов означает суммирование всех обнаруженных нейтронов. В этом случае источник нейтронов не может быть определен, так как не применяют метод совпадения. Присутствие значительного числа нейтронов является часто достаточным показателем присутствия делящегося ядерного материала. Все системы обнаружения совпадений нейтронов, кроме скорости счета совпадений нейтронов, определяют также скорости общего счета нейтронов.

2 РЕГИСТРАЦИЯ СОВПАДЕНИЯ НЕЙТРОНОВ

Счет совпадений нейтронов является частью очень стабильной, надежной и точной методики определения содержания Pu и U-235. Современные хорошо сконструированные системы совпадения нейтронов способны надежно обрабатывать импульсы в очень большом диапазоне скоростей счета на входе (более чем шесть порядков). Такая стабильность достижима с помощью разумного выбора и размещения электроники усиления, чтобы минимизировать влияние шума. Эти электронные платы, когда они помещены в головную часть детектора, усиливают и формируют импульсы, применяют дискриминацию низкого уровня к логическим импульсам (шириной в 50 нс) к внешнему контроллеру импульсов (контроллер электроники).

Надежная регистрация совпадений также обусловлена сложной схемой обработки импульсов (электроника сдвигового регистра). Импульсы внутри определенного периода времени (обычно устанавливается равным 64 мкс) один за другим могут быть коррелированы во времени (т.е. совпадать). Эта корреляция во времени связана с замедлением нейтронов в замедлителе. Электроника сдвигового регистра следит за совпадениями между импульсами, разделенными друг от друга временем, равным около 1000 мкс (случайные), и совпадениями в первые 64 мкс (действительные плюс случайные совпадения), и вычитает случайные совпадения, чтобы получить действительные совпадения. Применяются также другие небольшие автоматические корректировки.

ПАССИВНЫЕ СИСТЕМЫ РЕГИСТРАЦИИ имеют одну из двух базовых геометрических конфигураций: колодезные детекторы, полностью окружающие образец, и воротниковые детекторы, окружающие образец (например, топливную сборку) кольцом. Колодезные детекторы имеют предпочтительную геометрию, так как они имеют способность регистрировать все нейтроны, вышедшие из образца. Воротниковые детекторы имеют альтернативную конструкцию, которая подходит, когда образец становится слишком большим для того, чтобы его поместить внутрь колодезного детектора. Тогда как откалиброванные колодезные детекторы измеряют общую массу Pu в образце, воротниковые детекторы измеряют массу Pu на единицу длины топливной сборки. Чтобы получить величину общей массы Pu в сборке, эта линейная плотность должна затем быть умножена на эффективную длину топливной сборки

Существует большое число различных пассивных систем регистрации, которые оптимизированы для конкретных размеров и формы образцов, или диапазонов измеряемой массы Pu. Для целей гарантий, например, в настоящее время используется около двадцати таких систем.

АКТИВНЫЕ СИСТЕМЫ РЕГИСТРАЦИИ используют источники нейтронов (обычно AmLi) для определения U-235 в образце. В этом случае колодезная геометрия также имеет предпочтение, а воротниковая геометрия является практическим решением, когда образец является топливной сборкой. Полная система регистрации включает головную часть детектора, которая регистрирует нейтроны и включает в себя источник нейтронов; электронику, которая обеспечивает питанием детектор и определяет скорости совпадений нейтронов; портативный компьютер для управления и анализа данных, чтобы определить содержание U-235; принтер для формирования отчетов.

3 ИЗМЕРЕНИЕ ОТРАБОТАВШЕГО ТОПЛИВА

ИЗЛУЧЕНИЕ И РЕГИСТРАЦИЯ НЕЙТРОНОВ. Спонтанное деление Cm-242 и Cm-244 является основным источником нейтронов, излучаемых отработавшим топливом. Эти изотопы производятся в топливных сборках ядерного реактора в результате многократных событий захвата нейтронов. Продукты деления в отработавшем топливе производят чрезвычайно высокий фон излучения, в присутствии которого должны определяться нейтроны. Присутствие этого интенсивного излучения определяет методики, которые могут быть использованы для измерения отработавшего топлива. Один из подходов заключается в выборе детектора, который является нечувствительным к гамма-излучению. Другой подход заключается в экранировании гамма-излучения, но позволяет проходить нейтронам через экран к детектору нейтронов. Методы измерения отработавшего топлива включают не только регистрацию нейтронов, но также и регистрацию гамма-излучения и ультрафиолетового света (Черенковского излучения).

4 ДЕТЕКТОРЫ НЕЙТРОНОВ

Механизмы обнаружения нейтронов в веществе основаны на косвенных методах. Нейтроны являются нейтральными частицами. Процесс обнаружения нейтронов начинается, когда нейтроны, взаимодействуя с различными ядрами вещества, вызывают освобождение одной или более заряженных частиц. Электрические сигналы, произведенные заряженными частицами, могут затем быть обработаны системой регистрации.

Имеется два основных типа взаимодействий нейтронов с веществом. Во-первых, нейтроны могут быть рассеяны ядрами, передавая часть своей кинетической энергии ядру. Если передано достаточное количество энергии, ядро отдачи ионизирует материал вокруг точки взаимодействия. Этот механизм эффективен только для нейтронов, взаимодействующих с легкими ядрами. Во-вторых, нейтрон может вызвать ядерную реакцию. Продукты этих реакций, такие как протоны, альфа-частицы, гамма-излучение и осколки деления могут быть использованы для регистрации.

Детекторы, использующие либо механизм отдачи, либо ядерные реакции, могут содержать твердую, жидкую или газовую среду детектирования. Хотя выбор реакции ограничен, среда детектирования может изменяться.

ГАЗОНАПОЛНЕННЫЕ ДЕТЕКТОРЫ НЕЙТРОНОВ. He-3 и BF₃ детекторы тепловых нейтронов находят многие применения при пассивном и активном анализе, поскольку они являются относительно стабильными, эффективными и нечувствительными к гамма-излучению. В случае BF₃ газ обогащен изотопом B-10. В естественном гелии изотопа He-3 только около 0.1%, поэтому его обычно получают, отделяя от трития, полученного в ядерных реакторах. Эффективность регистрации тепловых нейтронов является высокой, а вероятность взаимодействия с гамма-излучением - низка. Однако, если относительное количество гамма-квантов больше, чем для типичных образцов плутония или урана, сигнал He-3 и BF₃ детекторов будет искаженным.

He-4 и CH₄ детекторы быстрых нейтронов основаны на отдаче легких ядер и ионизации газа в газонаполненной трубке. Это взаимодействие является упругим рассеянием нейтронов легкими ядрами среды. Несмотря на очевидные недостатки этих детекторов (детекторов типа отдачи) из-за низкой эффективности и нестабильности, процесс детектирования идет без предварительного замедления случайного нейтрона. Такой нейтрон регистрируется очень быстро, и сохраняется некоторая информация о его начальной энергии.

ПЛАСТМАССОВЫЕ И ЖИДКИЕ (ОРГАНИЧЕСКИЕ) СЦИНТИЛЛЯТОРЫ часто используются для быстрой регистрации нейтронов, из-за их быстрого отклика и умеренной стоимости. Быстрый отклик является практическим преимуществом для счетчиков совпадений, где отношение реальных событий совпадений к случайным совпадениям может значительно влиять на статистическую точность результатов измерений. Главным недостатком органических сцинтилляторов является их высокая чувствительность к гамма-излучению распада.