

УДК 543.522

АКТИВАЦИОННЫЙ МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ НЕЙТРОННОГО
ПОТОКА ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ДЕТЕКТОРОВ НА ОСНОВЕ РОДИЯ,
ИНДИЯ И СЕРЕБРА
ACTIVATION METHOD FOR DETERMINING THE NEUTRON FLUX
USING DETECTORS BASED ON RHODIUM, INDIUM AND SILVER

Вознесенский М. В., Чернышев В. М., Седов А. Р., Касаткин Н. И.,
Басов А. А., к-т. техн. наук, доцент; Семенов А. Н., ст. преподаватель,
Нижегородский государственный технический университет
им. Р. Е. Алексеева, г. Нижний Новгород, Россия
M. Voznesensky, V. Chernyshev, A. Sedov, N. Kasatkin, A. Basov, Candidate
of Technical Sciences, Associate Professor; A. Semenenko, Senior Lecturer,
Nizhny Novgorod State Technical University named after R. E. Alekseev,
Nizhny Novgorod, Russia

Аннотация. В работе рассмотрен активационный метод определения величины нейтронного потока с помощью детекторов на основе родия, индия и серебра. Определен период полураспада изотопов, образующихся после активации. Рассчитана величина активационного интеграла для каждого вида детектора. Проведен сравнительный анализ, в ходе которого был определен элемент, обладающий наилучшими качествами по ряду параметров.

Abstract. The paper considers an activation method for determining the magnitude of the neutron flux using detectors based on rhodium, indium and silver. The half-life of isotopes formed after activation is determined. The value of the activation integral for each type of detector is calculated. A comparative analysis was carried out, during which the substance with the best qualities in a number of parameters was determined.

Ключевые слова: Нейтронно-активационный анализ, нейтронный поток, активационный интеграл, полураспад, детектор, родий, индий, серебро.

Key words: Neutron activation analysis, neutron flux, activation integral, half-life, detector, rhodium, indium, silver.

ВВЕДЕНИЕ

Интенсивное развитие ядерной энергетики, а также широкий спектр применения ядерных энергетических установок для различных нужд человека, побуждают к необходимости эффективного решения проблем, основанных на прогнозировании последствий нейтронного облучения живых тканей, узлов механизмов, конструкционных материалов установки, а также радиоэлектронных изделий. Исходя из этого, важно с достаточно высокой точностью определять основные характеристики поля излучения

нейтронов различных энергий. Например, величину плотности потока нейтронов, благодаря которой можно определить флюенс нейтронов на облучаемой поверхности [1].

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Данные о величине нейтронного поля используются при расчете радиационной защиты установки. Для оценки влияния захватного гамма-излучения необходимы сведения о спектре тепловых нейтронов, для расчета прохождения излучения через большие толщины материала – быстрых. Радиометрия нейтронных полей реальных ядерных энергетических установок довольно сложна, и не каждый радиометрический метод будет работоспособным в реальных условиях применения. Кроме высокоинтенсивного нейтронного излучения, большое количество источников ионизирующих излучений в ядерной энергетике обладает также достаточно высоким уровнем гамма-фона. Данный факт определяет невозможность применения некоторых методов анализа нейтронных полей в реальных условиях, таких как, широко распространенного сцинтилляционного метода, или метода водородных пропорциональных счетчиков.

Известны также времяпролетные способы спектрометрии нейтронных полей, основанные на измерении скорости пролета нейтрона от источника до детектора, дальнейшего нахождения его кинетической энергии и, следовательно, восстановлении спектра исследуемого источника. Недостатком данного метода является невозможность измерения произвольных нейтронных потоков, имеющих место в реальных установках. Спектрометры такого типа не являются измерительными приборами, их работа реализуется с помощью сложного комплекса лабораторного оборудования при работе с одним источником ионизирующего излучения.

В работе рассматривается метод активационного анализа нейтронного поля, с помощью детекторов, выполненных из различных материалов. Данный метод имеет некоторые преимущества относительно методов, приведенных ранее. Например, возможно изготовление детектора достаточно малых размеров, что позволяет ему не вносить искажений в поток нейтронов в контролируемой точке, а также производить точечное измерение нейтронного потока. Также появляется возможность восстановления всего сложного энергетического спектра нейтронного излучения при использовании определенных наборов детекторов с наилучшим сечением взаимодействия с нейтронами заданной энергии. Преимуществом является и нечувствительность детекторов к гамма-фону исследуемого источника, что позволяет применять активационный метод для исследования полей высокоинтенсивных источников излучения. Однако данный метод требует значительного времени, необходимого для проведения эксперимента, складывающиеся из времени активации детектора до линии насыщения, времени измерения наведенной активности приборами и времени выдержки детектора. Выдержка необходима для полного распада накопившихся

изотопов, и отсутствия их влияния на дальнейшие измерения. Также данный вид анализа нейтронного поля не дает быстрой информации об исследуемом излучении и применим лишь для исследования постоянных нейтронных потоков, что делает его применение нецелесообразным, например, при пуске или останове ядерного реактора.

Благодаря своим особенностям активационный метод анализа нейтронного потока является одним из самых распространенных методов. Суть метода [2] заключается в том, что специальные вещества (детекторы) подвергаются облучению нейтронным потоком в течение определенного времени (времени активации). Под действием нейтронов в детекторах образуются радиоактивные изотопы, которые в дальнейшем претерпевают распад с выделением ионизирующих излучений. Количество квантов ионизирующего излучения пропорционально числу радиоактивных распадов (активности), которое, в свою очередь, пропорционально изначальному нейтронному потоку. Измеряя наведенную бета-активность в детекторе, можно рассчитать плотность потока нейтронов в контролируемой точке.

К детекторам предъявляется ряд требований [6]. Основным из них является период полураспада изотопов, возникающих в результате облучения нейтронным потоком. Излишне маленький период полураспада ведет к невозможности детектирования активности исследуемого образца, а при слишком большом периоде значительно возрастает время активации, которое в среднем составляет 3–4 периода полураспада, и в следствии этого, растет время измерений и эксперимента. Также детектор должен быть как можно более тонким, для избегания поглощения наведенного бета-излучения материалом самого детектора. Еще одним немаловажным требованием является чистота материала образца – он не должен содержать значительного количества примесей, так как сами примеси могут иметь наведенную активность, которая может значительно увеличить погрешность измерений.

При захвате нейтронов многие элементы образуют радиоактивные изотопы. Однако для практических целей выбор таких элементов ограничен возможностью получения их в удобном для экспериментов виде, достаточным сечением поглощения нейтронов и удобным для измерений периодом полураспада. В работе было решено использовать в качестве радиоактивных детекторов материалы на основе родия, серебра и индия. Чтобы определить какое вещество лучше всего подходит для нейтронно-активационного анализа проведена серия экспериментов, в ходе которых круглые, тонкие пластинки из этих материалов были помещены в поле Pu-Be источника (табл. 1) быстрых нейтронов на расстоянии 13 см от него.

Таблица 1

Радиационные параметры и размеры источника

Тип источника	Наружный размер, мм		Размер активной части, мм, не более		Поток быстрых нейтронов от источника в угол $4\pi_{ср}$, нейтр./с.	Активность, Бк, не более
	диаметр	высота	диаметр	высота		
ИБН-8	$24,0 \pm 0,3$	$36,0_{-1,0}$	16,0		$(2,0 \pm 0,4) \cdot 10^6$	$5,0 \cdot 10^{10}$

Средняя энергия быстрых нейтронов Pu-Be источника $E_0 = 4,55 \text{ МэВ}$.

Активация родия, серебра и индия часто используется при измерениях с тепловыми и надтепловыми нейтронами. Поэтому, между источником и детектором был расположен полиэтиленовый материал, толщиной 3,6 см.

Полиэтилен является хорошим замедлителем, так как содержит большое количество ядер водорода (на 19 % больше, чем у воды). Однако, используемой толщины этого вещества оказалось недостаточно для уменьшения кинетической энергии нейтронов до тепловых значений. Известно, что необходимо 5 см полиэтилена для замедления нейтронов от 10 МэВ до 0,025 эВ. Тогда, с достаточной точностью, можно определить энергию нейтронов после прохождения слоя материала в 3,6 см [3, с. 35–36].

$$E = E_0 \left(\frac{0,025 \text{ эВ}}{10 \cdot 10^6 \text{ эВ}} \right)^{\frac{3,6 \text{ см}}{5 \text{ см}}} = (4,55 \cdot 10^6) \text{ эВ} \cdot \left(\frac{0,025 \text{ эВ}}{10 \cdot 10^6 \text{ эВ}} \right)^{\frac{3,6 \text{ см}}{5 \text{ см}}} \cong 3 \text{ эВ} \quad (1)$$

Все измерения с помощью активационных детекторов были основаны на определении бета-активности с помощью счетчика БЕТА-1-1, наведенной надтепловыми нейтронами в веществе детектора. Чувствительность прибора к гамма-излучению является незначительной и учитывалась в виде паразитного фона.

Накопление изотопов в детекторе, облучаемом надтепловыми нейтронами, определяется результирующим действием двух процессов – образованием активных изотопов и радиоактивным распадом образующихся ядер. Однако, в некоторый момент времени эти процессы выравниваются и количество новых ядер достигает стационарного значения $N_{нас}$.

Детекторы активировались нейтронами до максимально возможной бета-активности, называемой активностью насыщения, величина которой пропорциональна максимальному количеству ядер.

$$A_{нас} = \eta \cdot \lambda \cdot N_{нас} = \eta \cdot \lambda \cdot \frac{\sigma \cdot \Phi \cdot n}{\lambda} = \eta \cdot \sigma \cdot \Phi \cdot n \left(\frac{\text{ядер}}{с} \right), \quad (2)$$

где λ – постоянная распада;

Φ – плотность потока;

n – число ядер в детекторе;

$\eta = \zeta \cdot \omega \cdot \varepsilon \cdot q \cdot s$ – общий поправочный коэффициент;

σ – сечение активации.

Процессы активации и счета бета-излучения сопровождаются совокупностью факторов, искажающих полученный результат, в связи с чем вводились поправочные коэффициенты, представленные ниже:

– $\zeta = 2$ – поправка на одностороннее расположение счетчика относительно детектора;

– $\omega = \frac{d_{\text{детектора}}^2}{d_{\text{счетчика}}^2}$ – поправка на не геометрические условия измерения;

– ε – поправка на эффективность регистрации излучения счетчиком;

– $q = e^{3,6 \text{ см} / 5,5 \text{ см}}$ – поправка на ослабление плотности потока нейтронов в полиэтилене, где 5,5 см – длина релаксации быстрых нейтронов;

– $s = 3$ – поправка на самопоглощение бета-излучения в индиевом и серебряном детекторах. Толщина этих материалов в 3 раза превышала длину максимального пробега электронов.

По результатам экспериментов с помощью выражения (2) рассчитывался поток быстрых нейтронов, а также поток нейтронов в угол 4π . Который сравнивался с теоретическим из табл. 1.

Далее приведены расчетные формулы и схемы распада детекторов.

Активационный интеграл, называемый скоростью реакции. Не зависит от периода полураспада и характеризует число актов данного взаимодействия, происходящих в образце за одну секунду в расчете на одно ядро изотопа мишени:

$$R = \sigma \cdot \Phi = \frac{\eta \cdot A_{\text{нас}}}{n}, \quad (3)$$

где n – полное число ядер в детекторе.

Плотность потока нейтронов:

$$\Phi = \frac{\eta \cdot A_{\text{нас}}}{\sigma \cdot n} \left(\frac{n}{\text{см}^2 \cdot \text{с}} \right). \quad (4)$$

Поток нейтронов в угол 4π от точечного источника:

$$F = \Phi \cdot 4\pi r^2 \text{ (н/с)}, \text{ где } r = 13 \text{ см} \quad (5)$$

На рис. 1, 2, 3 приведены сечения активации для нейтронов с энергией 3 эВ согласно справочникам [4–5]. В скобках сечения активации тепловыми нейтронами.

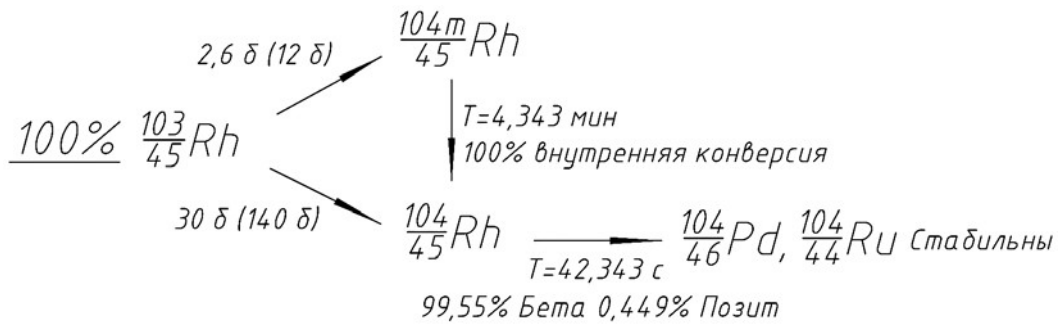


Рис. 1. Радиоактивные превращения ядра родия

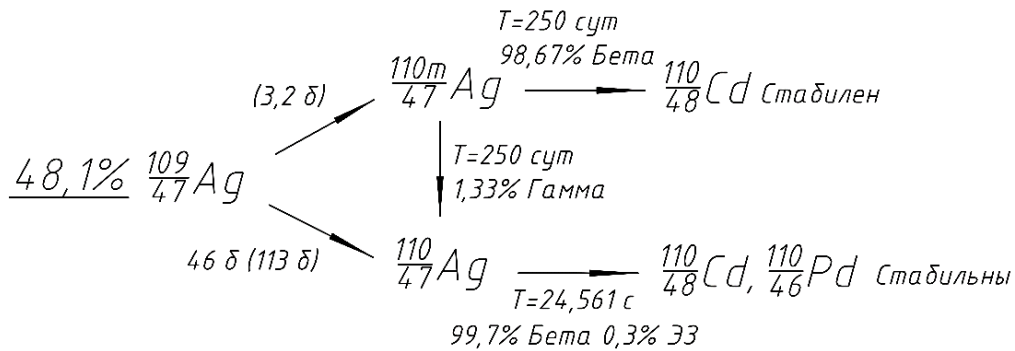
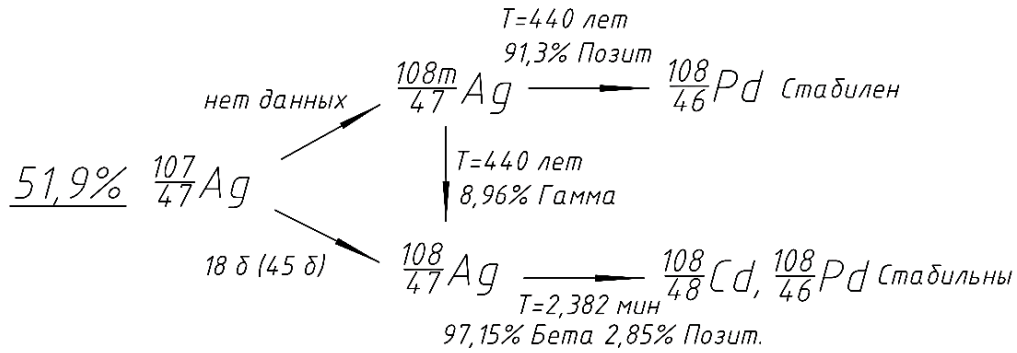


Рис. 2. Радиоактивные превращения изотопов серебра

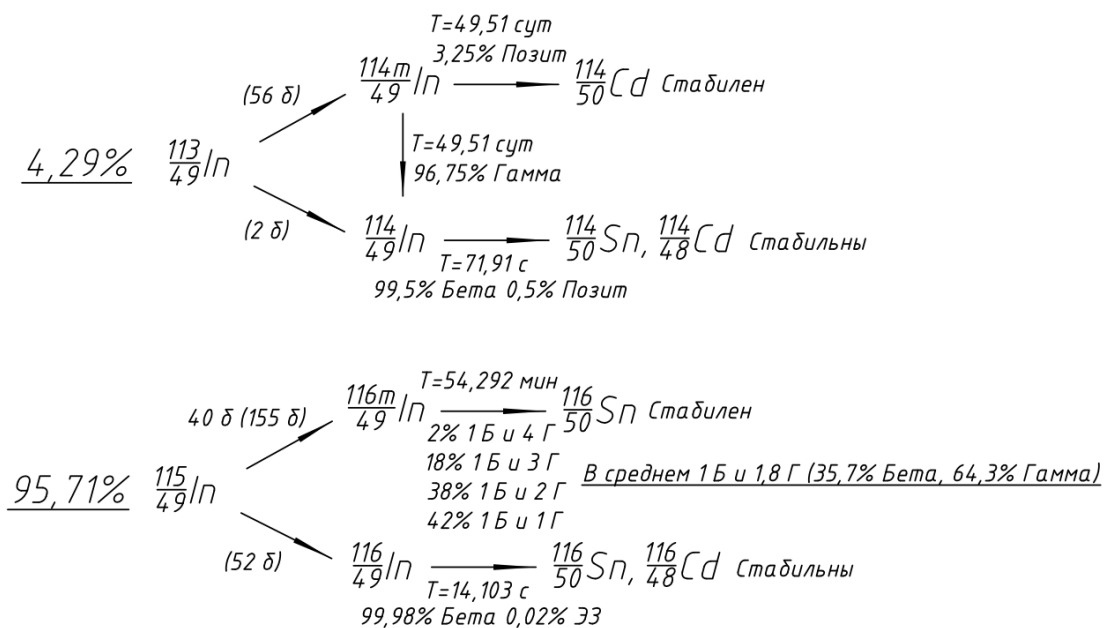


Рис. 3. Радиоактивные превращения изотопов индия

Процессы радиоактивного распада, представленные на рис. 1, 2, 3, довольно сложны так как в детекторах одновременно образуются различные изотопы в неодинаковом количестве в зависимости от периода полураспада и сечения активации. В расчетах по формулам (2), (3), (4) в качестве исходных данных для каждого детектора использовалось только одно направление активации:

- для родия направление с сечением 30 б (140 б);
- для серебра направление с сечением 46 б (113 б);
- для индия направление с сечением 40 б (150 б).

Активация каждого детектора была произведена три раза и усреднена (табл. 2).

Таблица 2

Результаты расчетов и сравнительная характеристика детекторов

Материал детектора	Период полураспада	Скорость активации (акт-й интеграл) $c^{-1} \cdot 10^{-20}$	Плотность потока нейтронов, $n / cm^2 \cdot c$	Поток быстрых нейтронов от источника в угол 4π , $n / c \cdot 10^6$
Родий	$43,2 \pm 1,7$ сек.	$2,98 \pm 0,05$	838 ± 15	$1,78 \pm 0,05$
Серебро	27 ± 8 сек.	$1,8 \pm 0,3$	790 ± 130	$1,7 \pm 0,3$
Индий	54 ± 8 мин.	$3,17 \pm 0,08$	828 ± 21	$1,76 \pm 0,05$

Плотность потока нейтронов была измерена радиометром. Результат прибора составил $780 n / cm^2 \cdot c$, что с учетом погрешности расстояния в 1 см дает поток $(1,7 - 1,9) \cdot 10^6$ в угол 4π .

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В качестве радиоактивного детектора оптимально использовать родий, обладающий приемлемым активационным интегралом и периодом полураспада, удобным для проведения серии экспериментов. А также индий, за счет наибольшей скорости активации. Однако, его применение ограничивается длительностью времени эксперимента, обусловленному большим периодом полураспада.

ЛИТЕРАТУРА

1. Крамер-Агеев Е. А. Активационные методы спектрометрии нейтронов / Е. А. Крамер-Агеев, В. С. Трошин, Е. Г. Тихонов. – М.: Атомиздат, 1976. – 232 с.
2. Ломакин, С. С. Радиометрия нейтронов активационным методом / С. С. Ломакин, В. И. Петров, П. С. Самойлов. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 141 с.

3. Власичев, Г. Н. Физика ядерных реакторов: учеб. Пособие / Г. Н. Власичев; Нижегород. гос. техн. ун-т. им. Р. Е. Алексеева. – Нижний Новгород, 2008. – 106 с.

4. Маслов И. А. Справочник по нейтронному активационному анализу / И. А. Маслов, В. А. Лукницкий; АН СССР, Отд-ние ядерной физики. – Л.: Наука. Ленингр.отд-ние, 1971. – 312 с.: граф. – Библиогр.: с. 301–307.

5. Гордеев, И. В. Ядерно-физические константы [Текст]: Справочник / И. В. Гордеев, Д. А. Кардашев, А. В. Малышев. – [2-е изд.]. – М.: Госатомиздат, 1963. – 507 с.

6. Вандекастеле К. Активационный анализ с использованием заряженных частиц: Пер.с англ. / К. Вандекастеле. – М.: Мир, 1991. – 208 с.: ил. – Библиогр.: с. 190–191.